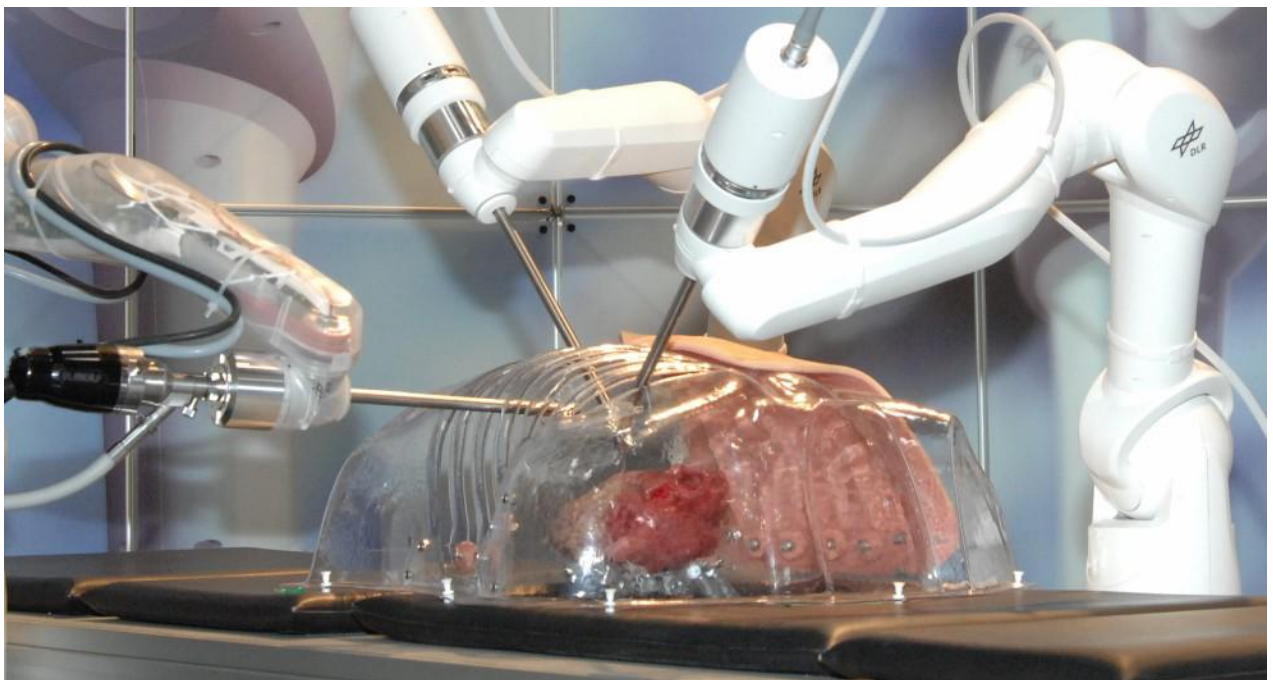


Kalibration des medizinischen Leichtbauroboters MIRO hinsichtlich der elastischen Roboterkinematik, der internen Momentensensorik und der Massenparameter



Diplomarbeit

Julian Klodmann - Matrikelnummer 2294470

5. Juli 2010

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. T. Ortmaier (IMES)
Prof. Dr.-Ing. J. Wallaschek (IDS)

Betreuer: Dr.-Ing. R. Konietschke (DLR)
Dipl.-Ing. A. Fuchs (IMES)
Dipl.-Ing. H. Eilers (IMES)

Aufgabenstellung für eine Diplomarbeit

Julian Klodmann

Titel der Arbeit: Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Kalibration des medizinischen Leichtbauroboters MIRO hinsichtlich der elastischen Roboterkinematik, der internen Momentensensorik und der Massenparameter

Development and Application of Methods for the Calibration of the Medical Lightweight Robot MIRO Regarding the Flexible Kinematic Model, the Internal Torque Sensors and the Masses

Kategorie: Diplomarbeit

Dauer: 3 Monate

Studienarbeit: Maschinenbau, Mechatronik

Aufgabenstellung: **Hintergrund:** Im Rahmen des Projektes MiroSurge wird ein 3-armiges Telerobotiksystem für die endoskopische Chirurgie entwickelt [1]. Lange, dünne Instrumente werden von Roboterarmen geführt und von dem Chirurg ferngesteuert. Die Instrumente werden dabei durch kleine Einschnitte in der Patientenhülle eingeführt, welche wiederum die Beweglichkeit der Instrumente auf 4 Freiheitsgrade limitieren. Um volle Beweglichkeit innerhalb des Patienten zu erlangen, verfügen die Instrumente im Inneren des Patienten über weitere Freiheitsgrade, sodass mit jedem Instrument volle Beweglichkeit in 6 Freiheitsgraden sowie Greifen möglich ist. Ein Kraft/Momentensensor an der Instrumentenspitze misst Kontaktkräfte und gibt diese dem Chirurg an der Eingabekonsolle zurück.

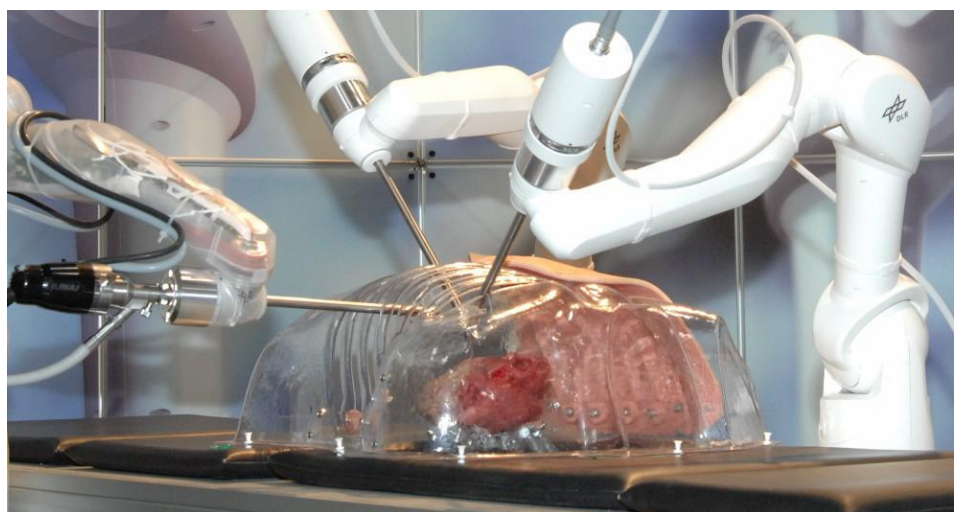


Bild: MiroSurge-System, Patientenseite

Ziel dieser Arbeit: Ein iteratives Verfahren zur Kalibration der Kinematik, der internen Momentensensorik und der Massenparameter soll entwickelt und angewandt werden. Dieses Verfahren soll die Kalibration am montierten Gesamtsystem des MIRO ermöglichen. Dabei kann auf eine bereits vorhandene Methode zur kinematischen Kalibration des Roboters zurückgegriffen werden.



Bild: MiroSurge-System, Eingabekonsolle

Aufgabenstellung: Zur Klärung der Aufgabenstellung soll zunächst eine Literaturrecherche erfolgen, ausgehend von [2], [3] und [4]. Als Ergebnis sollen die gängigen Methoden zur kinematischen Roboterkalibration unter Einbezug der Gelenkelastizitäten dargestellt werden. Des Weiteren sollen Methoden zur Kalibration der roboterinternen Momentensensorik und der Trägheitsparameter am bereits zusammengebauten Robotersystem recherchiert werden.

Im nächsten Schritt wird ein Konzept zur iterativen Kalibration der gesuchten Parameter erarbeitet. Dieses Konzept wird simulativ in der Rapid-Prototyping Umgebung Matlab/Simulink umgesetzt und evaluiert. Für jeden Kalibrationsschritt werden zudem Methoden implementiert, um ein Set von geeigneten Testposen des Roboters zu erzeugen, welche die zu kalibrierenden Parameter bestmöglich anregen.

Um die einzelnen Kalibrationsschritte am realen System durchzuführen, müssen angepasste Endeffektoren konstruiert und gefertigt werden. Diese sollen u.a. ermöglichen, verschiedene Gewichte am distalen Ende des Roboters anzubringen. Für die einzelnen Kalibrationen sollen Messdaten aufgenommen werden, wobei für die Kalibration der Kinematik eventuell auf bereits vorhandene Daten zurückgegriffen werden kann.

Nach der Ausführung der Einzelkalibrationen soll iterativ eine weitere Annäherung des Robotermodells an die Realität erreicht werden.

Zur Evaluation des kalibrierten Robotermodells sind Validierungsverfahren zu entwickeln (analog einer Posegenauigkeitsuntersuchung), und es soll eine abschließende Einschätzung der erreichten Genauigkeit getroffen werden.

Literatur:

[1] Hagn, U., Nickl, M., Jörg, S., Tobergte, A., Kübler, B., Passig, G., Gröger, M., Fröhlich, F., Seibold, U., Konietschke, R., Le-Tien, L., Albuschäffer, A., Grebenstein, M., Ortmaier, T. und Hirzinger, G.(2008), DLR MIROSURGE - Towards Versatility in Surgical Robotics, in Proceedings of curac, 2008, 7. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie e.V., Leipzig, ISBN 978-3-00-025798-8, pp. 143-146

[2] Khalil, W., Besnard, S. „Geometric Calibration of Robots with Flexible Joints and Links“ in Journal of Intelligent Robotic Systems, vol. 34, pp. 357-379, 2002

[3] Hollerbach, J., Ma, D. „Gravity Based Autonomous Calibration for Robot Manipulators“, IEEE Conference on Robotics, 1994

[4] An, C., Atkeson, C., Hollerbach, J. „Estimation of Inertial Parameters of Rigid Body Links of Manipulators“ in Proceedings of 24th Conference on Decision and Control 1985

Link zum Projekt:

<http://www.dlr.de/rm/desktopdefault.aspx/tabid-3835/6288read-9047/>

Geforderte/
gewünschte
Fähigkeiten:

- Studienrichtung Maschinenbau oder Mechatronik
- Grundkenntnisse in Robotik
- Freude an interdisziplinären Aufgabenstellungen
- Grundkenntnisse MatLAB/Simulink

Kontakt:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Robotik und Mechatronik
Dr.-Ing. Rainer Konietschke
Münchnerstrasse 20
D-82234 Wessling
Telefon: ++49 (0) 81 53 / 28 - 24 98
Telefax: ++49 (0) 81 53 / 28 - 11 34
rainer.konietschke@dlr.de

Ich versichere, dass ich diese Diplomarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Hannover, den 5. Juli 2010

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Formelzeichen und Abkürzungen | ix |
| 1. Einleitung | 1 |
| 1.1. Motivation | 2 |
| 1.2. Ziele der Arbeit | 2 |
| 2. Robotermodellierung und -kalibration | 5 |
| 2.1. Kinematik | 5 |
| 2.1.1. Genauigkeit als Leistungskenngröße von Robotern | 9 |
| 2.2. Kalibration einer Roboterkinematik | 11 |
| 2.2.1. Einzelachskalibration - Kreisbogenanalyse | 12 |
| 2.2.2. Statische 6D-Kalibration | 14 |
| 2.3. Roboterdynamik und Berechnung des Gravitationsmodells | 16 |
| 2.3.1. Rekursiver Newton-Algorithmus für den statischen Lastfall | 17 |
| 2.4. Identifikation der Massenparameter | 18 |
| 3. Komponenten des Gesamtsystems | 23 |
| 3.1. Medizinischer Leichtbauroboter MIRO | 23 |
| 3.1.1. Mechatronisches Konzept | 23 |
| 3.1.2. Roboterinterne Drehmomentensensorik des MIRO | 26 |
| 3.1.3. Kommunikation und Rechnerstruktur | 30 |
| 3.1.4. Identifikation der Gelenkparameter und Kalibration der Drehmomentensensorik | 31 |
| 3.2. Krypton - Koordinatenmessmaschine | 36 |
| 3.2.1. Hardwarekomponenten | 36 |
| 3.2.2. Softwareapplikationen | 38 |
| 3.3. Xsens - Inertial Measurement Unit | 38 |
| 4. Modellierung des Kalibrationsprozesses | 41 |
| 4.1. Erweiterung der statischen 6D-Kalibration um Gelenk- und Strukturelastizitäten | 41 |
| 4.1.1. Modellierung der Fehler im kinematischen Modell | 43 |
| 4.1.2. Herleitung einer angepassten direkten Kinematik | 44 |
| 4.1.3. Steifigkeitsanalyse der Sensorkörper | 45 |
| 4.1.4. Herleitung einer Zielfunktion für die Minimierung des Pose-Fehlers mittels nichtlinearer Optimierungsmethoden | 48 |
| 4.2. Kalibration der roboterinternen Momentensensorik | 51 |
| 4.2.1. Modellierung der Fehler im Modell der Drehmomentensensoren | 52 |
| 4.2.2. Identifikation der Sensorparameter mittels eines linearisierten Kalibrationsmodells | 54 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 4.2.3. | Posenplanung zur Drehmomentensensor-Kalibration | 57 |
| 4.2.4. | Untersuchung der Drehmomentensensorik hinsichtlich eines Tempera- turdrifts und Möglichkeit der Kompensation | 59 |
| 4.3. | Identifikation der Massenparameter des MIRO | 60 |
| 4.3.1. | Modellierung der Fehler im statischen Kraftmodell | 61 |
| 4.3.2. | Identifikation der Massenparameter mittels eines linearem Kalibrations- modells | 62 |
| 4.3.3. | Posenplanung für die Massenparameter- und Sensoroffset Identifikation | 64 |
| 5. | Simulationsergebnisse des Kalibrationsprozesses | 65 |
| 5.1. | Analyse des Rauschens der verwendeten Sensoren | 65 |
| 5.2. | Kalibration der Roboterkinematik | 67 |
| 5.3. | Kalibration der Drehmomentensensorik | 69 |
| 5.4. | Identifikation der Massenparameter | 71 |
| 6. | Messungen | 73 |
| 6.1. | Auslegung und Konstruktion eines multifunktionalen Kalibrationstools | 73 |
| 6.2. | Auslegung und Konstruktion eines Winkelprofils | 76 |
| 6.3. | Ablauf der Messungen | 78 |
| 7. | Darstellung und Analyse der Ergebnisse | 81 |
| 7.1. | Ergebnisse der Kalibration des kinematischen Robotermodells | 81 |
| 7.2. | Ergebnisse der Kalibration der roboterinternen Momentensensorik | 86 |
| 8. | Zusammenfassung und Ausblick | 93 |
| 8.1. | Zusammenfassung | 93 |
| 8.2. | Ausblick | 95 |
| A. | Anhang | 97 |
| A.1. | Kalibration einer Roboterkinematik | 97 |
| A.2. | Positionsübertragungsmatrizen | 97 |
| A.3. | Auslegung und Konstruktion eines multifunktionalen Kalibrationstools | 98 |
| A.4. | Auslegung und Konstruktion eines Winkelprofils | 107 |
| | Literaturverzeichnis | 111 |

Formelzeichen und Abkürzungen

Mathematische Werte, die eine skalare Größe darstellen, werden mit Kleinbuchstaben symbolisiert. Vektoren werden mit fettgedruckten Kleinbuchstaben und Matrizen mit fettgedruckten Großbuchstaben dargestellt.

Selten benutzte Formelzeichen und Begriffe sowie abweichende Bedeutungen werden ausschließlich im Text erläutert.

Indizes

| | |
|----------|---|
| d | Sollgröße aus Modell |
| i | Gelenkindex $i \in [0, 1, \dots, 7]$ |
| j | Messwertindex bzw. Laufvariable $j \in [1, 2, \dots, k]$ |
| m | Vollbrücke eines Drehmomentensensors bzgl. eines Gelenks $m \in [1, 2]$ |
| pot_i | Sensorwerte der Gelenkpotentiometer (Abtriebsseitig) |
| s | Drehmomentsensor-Koordinaten |
| Θ | Sensorwerte der Motorencoder (Antriebsseitig) |

Symbole

| | |
|--------------|--|
| a | translatorische Verschiebung in x-Richtung gemäß DH-Notation |
| \mathbf{b} | Vektor der Messwerte bei linearen Minimierungsproblemen |
| \mathbf{c} | Coriolis- und Zentrifugalanteile der dynamischen Zusammenhänge |
| d | translatorische Verschiebung in z-Richtung gemäß DH-Notation |
| \mathbf{g} | $[3 \times 1]$ Schwerkraftsvektor |
| m | Masse der abtriebsseitigen Last |
| n | Anzahl der Freiheitsgrade |
| \mathbf{q} | Abtriebsseitige Gelenkkonfiguration |
| \mathbf{t} | $[3 \times 1]$ Translationsvektor |
| \mathbf{w} | $[6 \times 1]$ Belastungsvektor bzgl. der Gelenke |
| \mathbf{x} | Parametervektor bei linearen Minimierungsproblemen |
| \mathbf{A} | Koeffizientenmatrix bei linearen Minimierungsproblemen |
| \mathbf{D} | Dämpfungsmatrix bzgl. der Gelenke |
| \mathbf{K} | Steifigkeitsmatrix bzgl. der Gelenke |

| | |
|-----------------------|--|
| J | Jacobi-Matrix |
| M | Massenmatrix eines Roboters |
| R | $[3 \times 3]$ Rotationsmatrix |
| Q | Positionsübertragungsmatrix |
| T | $[4 \times 4]$ Transformationsmatrix |
| α | Rotationswinkel um x-Achse gemäß DH-Notation |
| θ | Rotationswinkel um z-Achse gemäß DH-Notation |
| Γ | Screw-Transformationsmatrix eines Belastungsvektors |
| κ | Konfigurationsraum eines Roboters |
| λ | Größenabweichung eines geschätzten Parameters von seinem realen Wert |
| σ | Standardabweichung |
| τ | Drehmomentvektor |
| χ | Arbeitsraum eines Roboters |

Abkürzungen

| | |
|-----|------------------------------|
| DMS | Dehnungsmessstreifen |
| FEM | Methode der Finiten Elemente |
| TCP | Tool Center Point |

1. Einleitung

Seit den frühen neunziger Jahren entwickelt das Institut für Robotik und Mechatronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) Leichtbauroboterarme. Anfangs für Manipulationsaufgaben im Weltraum bestimmt, haben sich im Laufe der Jahre zahlreiche weitere Einsatzgebiete der Roboterarme entwickelt. Die Schwerpunkte liegen in der Industrierobotik, Servicerobotik, wie auch der Medizinrobotik [4]. Die massearme und elastische Struktur der Roboter, wie auch die integrierte Positions- und Drehmomentensensorik in jedem Gelenk lassen innovative Steuerungs- bzw. Regelungsansätze zu. Hierdurch kann eine Mensch-Maschine-Interaktion sicher und effektiv umgesetzt werden [5].

2006 ist der erste Prototyp eines medizinischen Leichtbauroboters, der KineMedic, entwickelt worden. Ein kompaktes und anthropomorphes Design des Roboterarmes und eine speziell optimierte Kinematik mit 7 Freiheitsgraden führen mit den oben genannten Aspekten der DLR-Leichtbauroboter zu einer Vielzahl möglicher Applikationen in der robotergestützten Chirurgie. Die Vielseitigkeit des KineMedic wurde hinsichtlich verschiedener chirurgischer Einsätze, wie der Durchführung von Biopsien¹ und dem Setzen von Pedikelschrauben² mit innovativen Steuerungs- und Regelungskonzepten evaluiert [20]. Darauf folgte im Jahr 2008 die zweite Generation der medizinischen Leichtbauroboter des DLR, der MIRO. Der MIRO wurde entsprechend der medizinischen Anwendungsgebiete des KineMedic, sowie der Führung von Lasereinheiten zur Osteotomie³ und der endoskopischen, minimal-invasiven Chirurgie mittels Telepräsenzsystemen ausgelegt [9]. Zur Forschung an roboterassistierten Anwendungen in der Medizin stehen zur Zeit drei Roboterarme am DLR zur Verfügung.



(a) Manuell geführter KineMedic



(b) MIRO auf der Automatica 2008

Abbildung 1.1.: Erste und zweite Generation der medizinischen Leichtbauroboter des DLR [11; 20]

¹Die Biopsie bezeichnet in der Medizin die Gewebeentnahme aus dem lebenden Organismus.

²Pedikelschrauben werden in der Wirbelsäulen-Chirurgie eingesetzt.

³Osteotomie ist der medizinische Fachbegriff für das Schneiden von Knochen.

1.1. Motivation

Bei der Laserosteotomie, sowie bei der Vermeidung radialer Kräfte auf den Trokarpunkt⁴ in der minimal-invasiven Chirurgie, ist eine hohe Positioniergenauigkeit des Roboters erforderlich. Zur Einhaltung und kraftfreien Lagerung des minimal-invasiven Instrumentes im Trokar kann zusätzlich die Drehmomentensensorik genutzt werden. Hierdurch ist die Bestimmung von Richtung und Betrag externer Belastungen möglich, die auf das Instrument wirken. Eine Kraftregelung kann die externen Kräfte kompensieren. Zur Umsetzung von sicherheitsrelevanten Regelungskonzepten, wie der Kollisionsdetektion und Reaktion, ist ebenfalls die genaue Kenntnis der Drehmomente um die einzelnen Gelenke nötig [8].

Auch die grundlegenden Ansätze, die zur Steuerung und Regelung elastischer Leichtbauroboter entwickelt wurden, erfordern eine genaue gelenkseitige Drehmomentensensorik. Hierzu zählen die Impedanz- und Drehmomentenregelung, sowie die Graviationskompensation [4]. Beim MIRO spielen die intergrierten Drehmomentensensoren eine wichtige Rolle, deren Messachsen teilweise mit Versatz zu den Rotationsachsen der Gelenke liegen. Bisher findet die Kalibration der Drehmomentensensoren auf einem Gelenkidentifikationsprüfstand statt. Hier wird jedes Gelenk einzeln aufgebaut und die Kalibration durchgeführt. Durch die darauffolgende Montage des Roboters können mechanische Spannungen in den Sensorkörpern resultieren, die wiederum zu permanenten Materialdehnungen führen können. Diese Effekte mindern die Genauigkeit der Umrechnung der elektrischen Sensordaten in physikalische Größen bzw. Drehmomente mittels der vorher identifizierten Kalibrationsmatrix. Durch den Abstand der Drehmomentensensoren von den Gelenkachsen ist ebenso die Berechnung der inversen Roboterdynamik nötig. Diese ermöglicht die Determinierung der Drehmomente um die Gelenkachsen, die zur Regelung der Motorströme verwendet werden. Die Trägheitsparameter, die hierfür notwendig sind, werden zur Zeit aus den CAD-Daten extrahiert. Bei der Erzeugung der CAD-Daten können allerdings einige Komponenten nicht effektiv modelliert werden. Daraus können Abweichungen von etwa 5% in der Größe der Trägheitsparameter entstehen [4]. Die Abweichungen führen zu Fehlern in der Berechnung und somit der Erfassung der Drehmomente. Das dynamische Robotermodell erfordert ebenso die Kenntnis des kinematischen Modells. Die Kinematik vom MIRO wird bereits mit einem speziellen Verfahren identifiziert. Diese Methode berücksichtigt allerdings nicht die elastische Struktur des Roboters.

Durch eine Kalibration des elastischen, kinematischen Robotermodells, eine Kalibration der roboterinternen Drehmomentensensorik am montierten Gesamtsystem, sowie eine abschließende Identifikation der Massen und Massenschwerpunkte der Roboterglieder kann die Leistungsfähigkeit der oben beschriebenen Steuerungs- und Regelungskonzepte effizienter ausgenutzt werden.

1.2. Ziele der Arbeit

Zielsetzung dieser Diplomarbeit ist es das bereits bestehende Verfahren zur Kalibration der Roboterkinematik des MIRO durch den Einfluss der elastischen Roboterstruktur zu erweitern und durchzuführen. Desweiteren soll eine Methode entwickelt werden die Drehmomentensen-

⁴Der Trokarpunkt ist eine Inzision am Thorso des Patienten, in dem ein Trokar gelagert wird, durch den wiederum minimal-invasive Instrumente in den Patienten geführt werden

sorik des MIRO am Gesamtsystem und unter der Ausnutzung der identifizierten Roboterkinematik zu kalibrieren. Mit der Kenntnis der Drehmomente im Sensorkoordinatensystem sollen die Trägheitsparameter, wie Massen und Massenschwerpunkte der einzelnen Glieder, identifiziert werden. Als Grundlage dient hierbei ein Verfahren, welches bereits an dem Leichtbauroboter des DLR (LBR III) angewendet wird. Dieses ist entsprechend gelenkfernen Drehmomentensensorik beim MIRO anzupassen und durchzuführen. Nach der Anwendung der einzelnen Kalibrationsschritte, wie in Abbildung 1.2 verdeutlicht, soll mit einer Wiederholung des Kalibrationsprozesses, eine iterative Annäherung an die Realität und Verbesserung des Robotermodells überprüft werden.

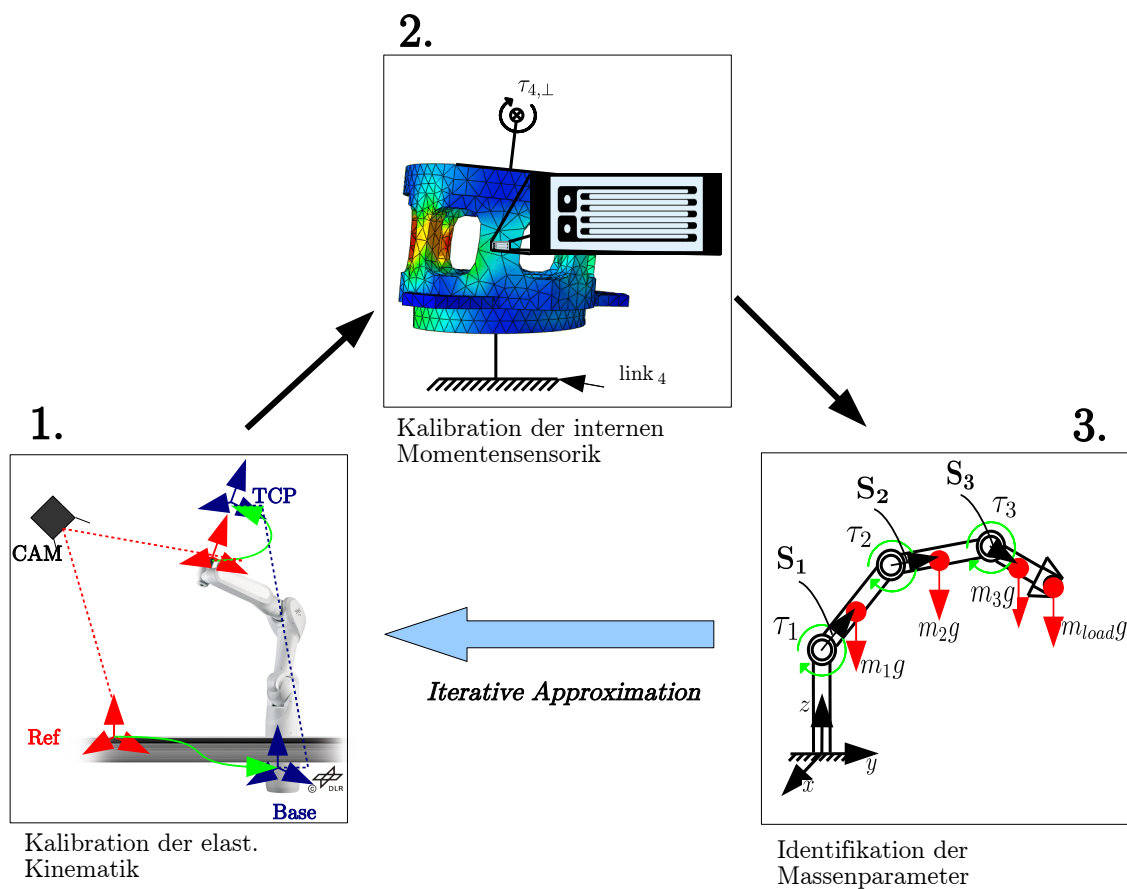


Abbildung 1.2.: Iterative Vorgehensweise bei der Roboterkalibration

Zu Beginn dieser Arbeit werden in dem Kapitel 2 die Grundlagen der Roboterkinematik und -dynamik aufgegriffen und dargestellt. Daraufhin erfolgt eine Literaturrecherche über die einzelnen Kalibrationsschritte und eine Zusammenfassung der daraus resultierenden Erkenntnisse. Zudem werden die bisher am DLR verwendeten Verfahren zur Kalibration der Roboterkinematik und Identifikation der Massenparameter vorgestellt. Kapitel 3 beschreibt die verwendeten Hard- und Softwarekomponenten in ihrer Funktionsweise. Daraufhin werden in Kapitel 4 die Modellfehler in Kinematik, Sensorik und dem dynamischen Modell charakterisiert und die Modellierung der einzelnen Kalibrationsschritte durchgeführt. Durch die

Simulation des gesamten Kalibrationsprozesses in Kapitel 5 sollen die Verfahren auf ihre Tauglichkeit überprüft werden. Die Beschreibung der Planung und Umsetzung der experimentellen Messwertaufnahme, erfolgt in Kapitel 6. Daraufhin wird die Darstellung und anschließende Diskussion der Ergebnisse bzgl. der Kalibration der Roboterkinematik und der internen Drehmomentensensorik durchgeführt (Kapitel 7). Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit werden abschließend zusammengefasst und ein Ausblick über zukünftig zu lösende Problemstellungen in der Robotermodellierung und Kalibration gegeben (Kapitel 8).

2. Robotermodellierung und -kalibration

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Methoden zur Modellierung der Kinematik und Dynamik von Robotern vorgestellt. Hierauf beruht die Entwicklung der einzelnen Kalibrationen. Desweiteren erfolgt eine Zusammenfassung der bereits bestehenden Verfahren zur Kalibration der Roboterkinematik. Diese sind in einer zuvor durchgeführten Projektarbeit entstanden und bilden die Grundlage für die Weiterentwicklung gemäß der Aufgabenstellung [19]. Zudem werden die wichtigsten Erkenntnisse einer Literaturrecherche aufgeführt, die hinsichtlich der Drehmomentensensorkalibration und Identifikation der Trägheitsparameter durchgeführt wurde.

2.1. Kinematik

Die Beschreibung der Position eines Körpers im Raum erfolgt durch einen dreidimensionalen Vektor \mathbf{t}_P^B , der die Koordinaten in x-, y- und z- Richtung im Bezugskoordinatensystem B beinhaltet. Dieser beschreibt die Translation vom Ursprung des Koordinatensystems B zum Punkt P. Abbildung 2.1 verdeutlicht die folgenden Zusammenhänge.

$$\mathbf{t}_P^B = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Für die vollständige Beschreibung der Lage eines Körpers im Raum in 6 Freiheitsgraden wird zusätzlich dessen Orientierung benötigt. Diese beinhaltet die 3 rotatorischen Freiheitsgrade. Mathematisch kann die Orientierung in einer 3x3 Rotationsmatrix beschrieben werden. Deren Spalten setzen sich aus den Einheitsvektoren des Koordinatensystems im Punkt P, dargestellt in dem Bezugskoordinatensystem B zusammen.

$$\mathbf{R}_P^B = [\mathbf{e}_{P,x}^B, \mathbf{e}_{P,y}^B, \mathbf{e}_{P,z}^B] \quad (2.2)$$

Die Orthogonalität der Rotationsmatrizen führt zu folgendem Zusammenhang:

$$(\mathbf{R}_P^B)^{-1} = (\mathbf{R}_P^B)^T = \mathbf{R}_B^P \quad (2.3)$$

Der rotatorische und der translatorische Anteil der Lagebeschreibung werden in sogenannten homogenen Transformationsmatrizen zusammengefasst. Die Transformationsmatrix \mathbf{T}_P^B vom Bezugskoordinatensystem B zum Koordinatensystem in Punkt P lautet

$$\mathbf{T}_P^B = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_P^B & \mathbf{t}_P^B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

und wird als Pose bezeichnet. Aufgrund der Homogenität der Transformationsmatrizen gilt zudem

$$(\mathbf{T}_P^B)^{-1} = \mathbf{T}_B^P . \quad (2.5)$$

Die Transformation der oben beschriebenen Pose in ein anderes Bezugskoordinatensystem K, wird durch Multiplikation mit einer Transformationsmatrix erreicht. Diese beschreibt die Lage des alten Bezugskoordinatensystems B bzgl. des Zielkoordinatensystems K.

$$\mathbf{T}_P^K = \mathbf{T}_B^K \cdot \mathbf{T}_P^B, \quad (2.6)$$

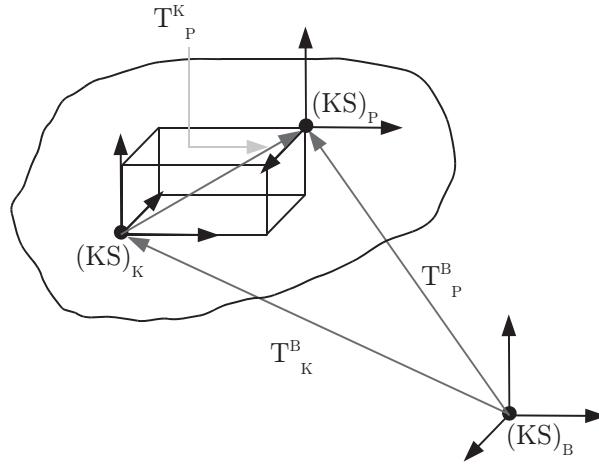


Abbildung 2.1.: Darstellung der Koordinatensysteme und der Transformationen

Die Pose des **Tool Center Points**¹ bzgl. des Bezugskoordinatensystems in der Roboterbasis \mathbf{T}_{TCP}^{Base} kann über den funktionellen Zusammenhang mit den abtriebsseitigen Gelenkkoordinaten \mathbf{q} berechnet werden:

$$\mathbf{T}_{TCP}^{Base} = f(\mathbf{q}) . \quad (2.7)$$

Dieser wird auch als **Direkte Kinematik** oder Vorwärts Kinematik bezeichnet. Die Modellierung der Transformationsvorschrift zur Berechnung der Transformationen von Gelenk $i - 1$ zu Gelenk i erfolgt in den meisten Fällen mit den Denavit-Hartenberg Parametern. Für den MIRO wurde die Notation nach Yoshikawa und Craig gewählt, die im folgenden beschrieben wird [7]. Hierbei sind vier Parameter nötig, um eine Transformation zu beschreiben. Zwei DH-Parameter beschreiben eine Transformation bzgl. der x-Achse. Die Translation wird durch a_{i-1} definiert, während die Rotation um die x-Achse durch α_{i-1} festgelegt ist. Die verbleibenden zwei DH-Parameter beschreiben die Transformation bzgl. der neuen z-Achse. Der Parameter d_i beschreibt den Translationsanteil und Θ_i den Rotationsanteil jener Transformation. Eine schematische Darstellung der oben beschriebenen kinematischen Zusammenhänge ist Abbildung 2.2 zu entnehmen.

¹Der Tool Center Point (Abk.: TCP) ist ein definierter Punkt am Roboter oder dessen Werkzeug. Er repräsentiert diejenige Position, die für die Manipulationsaufgabe von besonderer Wichtigkeit ist und beispielsweise in Kontakt mit der Umwelt steht.

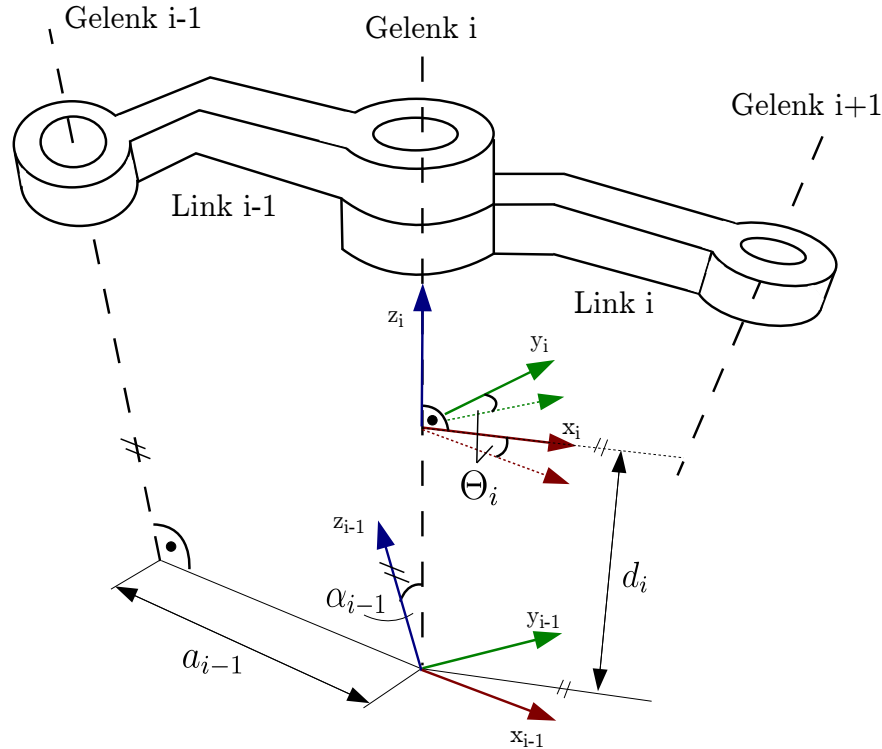


Abbildung 2.2.: Kinematische Zusammenhänge beschrieben durch DH-Parameter nach Yoshikawa und Craig

Die Transformationen \mathbf{T}_i^{i-1} von Gelenk $i-1$ zu Gelenk i lassen sich mit den DH-Parametern gemäß der Transformationsvorschrift (2.8) bestimmen.

$$\mathbf{T}_i^{i-1}(q_i) = \begin{bmatrix} \cos(\Theta_i + q_i) & -\sin(\Theta_i + q_i) & 0 & a_{i-1} \\ \sin(\Theta_i + q_i) \cdot \cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\Theta_i + q_i) \cdot \cos(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1}) \cdot d_i \\ \sin(\Theta_i + q_i) \cdot \sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\Theta_i + q_i) \cdot \sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1}) \cdot d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Eine serielle Multiplikation der einzelnen Transformationen gemäß folgender Gleichung (2.9) ergibt die Pose des TCPs bzgl. des Koordinatensystems in der Roboterbasis $\mathbf{T}_{TCP}^{Base}(\mathbf{q})$. Die Roboterbasis entspricht dem Index $i = 0$ und der TCP der Indizierung $i = n$, wobei n der Anzahl der Freiheitsgrade des Roboters entspricht:

$$\mathbf{T}_{TCP}^{Base}(\mathbf{q}) = \prod_{i=1}^n \mathbf{T}_i^{i-1}(q_i). \quad (2.9)$$

Die Inverse Kinematik beschreibt die Umkehrfunktion der Direkten Kinematik (2.7). Sie beschreibt den funktionellen Zusammenhang zwischen kartesischer Pose \mathbf{T}_{TCP}^{Base} , die im Arbeitsraum des Roboters liegt und den abtriebsseitigen Gelenkkordinaten \mathbf{q} . Der symbolische Zusammenhang für die Inverse Kinematik ergibt sich wie folgt:

$$\mathbf{q} = f^{-1}(\mathbf{x}). \quad (2.10)$$

Der Arbeitsraum χ entspricht dem kartesischen Raum, den der TCP erreichen kann. Die Limitierung des Arbeitsraumes erfolgt durch den Konfigurationsraum κ des Roboters .

$$\chi := \{\mathbf{x} | \mathbf{x} = f(\mathbf{q}) \wedge \mathbf{q} \in \kappa\} \quad (2.11)$$

Der Konfigurationsraum des Roboters wird durch die Laufweiten der einzelnen Gelenke begrenzt.

Bei redundanten Robotern, wie dem MIRO mit sieben Freiheitsgraden [12], ist die Inverse Kinematik nicht eindeutig lösbar. Ist die Anzahl der nötigen Freiheitsgrade für einen Taskspace² χ_{Task} geringer, als die Anzahl n der Freiheitsgrade des Roboters in Gelenkkordinaten, liegt eine redundante Roboterkinematik vor. Formell ergibt sich die Bedingung für redundante Roboter:

$$\dim \mathbf{q} > \dim \mathbf{x}(\chi_{Task}) . \quad (2.12)$$

Hieraus folgt, dass für eine bestimmte Pose im Raum unendlich³ viele zielführende Gelenkkonfigurationen existieren. Abbildung 2.3 soll diesen Zusammenhang verdeutlichen. Dargestellt ist eine serielle Roboterkinematik mit drei rotatorischen Gelenken, deren Achsen senkrecht zur Bildebene verlaufen. Hierbei ist der Taskspace zweidimensional, während der Roboter 3 Freiheitsgrade in diesem Taskspace bereitstellt. Somit ist der dargestellte Roboter redundant.

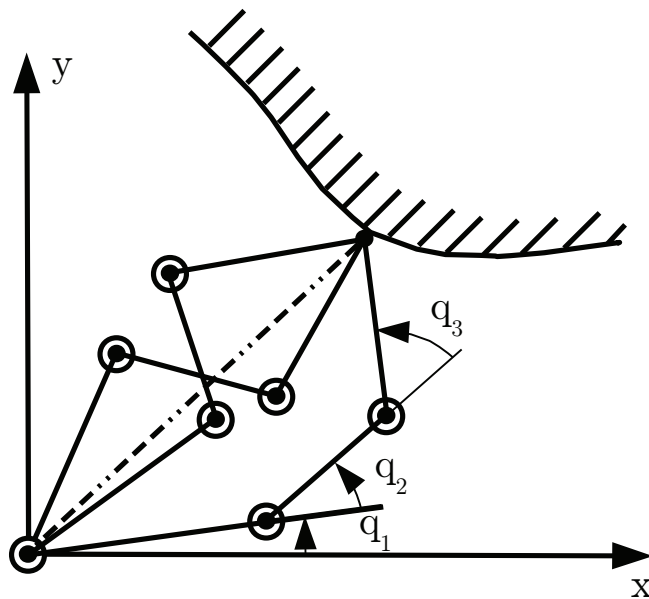


Abbildung 2.3.: Kinematische Redundanz [15]

Für die Lösung der inversen Kinematik stehen verschiedene numerische und analytische Verfahren zu Verfügung [18].

²Taskspace ist die Bezeichnung für einen aufgabenspezifische Arbeitsraum.

³durch die Diskretisierung der Positionssensorik limitiert

2.1.1. Genauigkeit als Leistungskenngröße von Robotern

Wichtige Leistungskenngrößen eines Roboters sind die **Pose-Genauigkeit** und die **Pose-Wiederholgenauigkeit**, die in diesem Abschnitt gemäß der ISO-Norm 9283 näher erläutert werden [1].

Die Pose-Genauigkeit ist definiert als die Abweichung zwischen den Sollposen und dem Mittelwert der erreichten Istposen des TCPs. Diese ergeben sich beim Anfahren von mindestens 5 geplanten Sollposen, wobei für die Berechnung 30 Zyklen aufgenommen werden [1]. Man unterteilt die Pose-Genauigkeit in **Positions-Genauigkeit** AP_p (2.13) und **Orientierungs-Genauigkeit** (2.15).

Die Positions-Genauigkeit beschreibt die Differenz der Sollposition und dem Mittelwert der erreichten Istpositionen:

$$AP_p = \sqrt{(\bar{x} - x_d)^2 + (\bar{y} - y_d)^2 + (\bar{z} - z_d)^2} . \quad (2.13)$$

Hierbei stellen x_d , y_d und z_d die Koordinaten der Sollpose dar. \bar{x} , \bar{y} und \bar{z} beschreiben die Koordinaten des Mittelwerts der angefahrenen Istposen (x_j, y_j, z_j) . Die Mittelwerte der einzelnen Komponenten werden wie folgt berechnet:

$$\bar{x} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=1}^k x_j, \quad \bar{y} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=1}^k y_j \quad \text{und} \quad \bar{z} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=1}^k z_j \quad \text{mit } j \in [1, 2, \dots, k]. \quad (2.14)$$

Die Positions-Genauigkeiten können auch einzeln für die jeweiligen Koordinatenrichtungen angegeben werden.

Die Orientierungs-Genauigkeiten AP_α , AP_β und AP_γ sind definiert als die Differenz zwischen den Sollorientierungen $(\alpha_d, \beta_d, \gamma_d)$ und dem Mittelwert der jeweiligen Istorientierungen $(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma})$. Hierbei sind die Winkel entsprechend der genutzten Konvention anzugeben, wie beispielsweise den Euler-Winkeln [27]. Die Mittelwerte der Istorientierungen werden analog zu (2.14) berechnet. Es ergeben sich folgende Orientierungs-Genauigkeiten:

$$\begin{aligned} AP_\alpha &= (\bar{\alpha} - \alpha_d) \\ AP_\beta &= (\bar{\beta} - \beta_d) \\ AP_\gamma &= (\bar{\gamma} - \gamma_d) . \end{aligned} \quad (2.15)$$

Die Pose-Genauigkeit eines Robotersystems hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab. Besonderen Einfluss hat die Modellierung der Roboterkinematik und die hier beinhalteten Abweichungen gegenüber der realen Roboterstruktur. Zu unterscheiden sind zum einen rein geometrische Fehler und zum anderen Fehler nicht geometrischen Ursprungs. Die geometrischen Ungenauigkeiten entstehen während der Montage und Fertigung des Roboters, aufgrund entsprechender Toleranzen. Typische geometrische Fehler sind Längenabweichungen der Glieder, Winkelfehler, die die Anordnung aufeinanderfolgender Gelenke betreffen, sowie Nulllagenfehler. Nulllagenfehler oder Offsets der Gelenkpositionssensorik entstehen bei deren Kalibration.

Elastizitäten in den Gliedern und Gelenken, sowie Getriebeispiel sind typische nicht geometrische Parameter, die die Pose-Genauigkeit beeinflussen. Auch, wenn jeder der hier genannten

Fehler sehr gering ist, führt dies dennoch zu grossen Positioniergenauigkeiten. Geringe Fehler in den Winkelparametern α_{i-1} und Θ_i vor allem in proximalen Gelenken führen, verstärkt durch Glied- und Werkzeuglängen, zu mehreren Millimetern Abweichung am TCP. Abweichungen in den translatorischen Parametern a_{i-1} und d_i liefern ein ihnen entsprechendes Fehlermaß am TCP.

Die Pose-Wiederholgenauigkeit beschreibt die Differenz zwischen einer Sollpose und einer erreichten Istpose. Die Posen werden mit derselben Bahn wiederholt angefahren und die Lage des Endeffektors vermessen. Die meisten Industrieroboter erreichen bei der Pose-Wiederholgenauigkeit einen Wert von wenigen zehntel Millimetern [2]. Dies resultiert aus den hoch auflösenden Positionssensoren der Gelenke, die eine genaue Wiederholung einer Bahn ermöglichen. Die Pose-Wiederholgenauigkeit kann durch eine kinematische Kalibration des Roboters nicht beeinflusst werden. Dadurch stellt sie das minimale Maß für die erreichbare Pose-Genauigkeit dar [28].

Auch bei der Berechnung und Dokumentation der Pose-Wiederholgenauigkeit wird zwischen Position und Orientierung unterschieden.

Die **Positions-Wiederholgenauigkeit** beschreibt den Radius eines Kreises, dessen Mittelpunkt ebenso der Mittelwert der erreichten Istposen ist. Dieser Radius berechnet sich zu

$$RP_l = \bar{l} + 3 \cdot S_l. \quad (2.16)$$

Hierbei ist \bar{l} der Mittelwert der Abstände der j -ten Istpose zum Mittelwert der Istposen l_j . l_j berechnet sich wie folgt:

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2}. \quad (2.17)$$

Bildet man zu l_j noch den Mittelwert analog zu (2.14) erhält man \bar{l} . Mit S_l wird die Standardabweichung aller l_j angegeben:

$$S_l = \sqrt{\frac{1}{1-n} \cdot \sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}. \quad (2.18)$$

Die **Orientierungs-Wiederholgenauigkeit** wird über die Standardabweichungen der Winkel der einzelnen Istposen ($\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$) von den Mittelwerten ($\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma}$) berechnet.

$$RP_\alpha = 3 \cdot S_\alpha, \quad RP_\beta = 3 \cdot S_\beta \quad \text{und} \quad RP_\gamma = 3 \cdot S_\gamma \quad (2.19)$$

Abbildung 2.4 soll Aufschluss über die oben beschriebenen Genauigkeitsmerkmale geben.

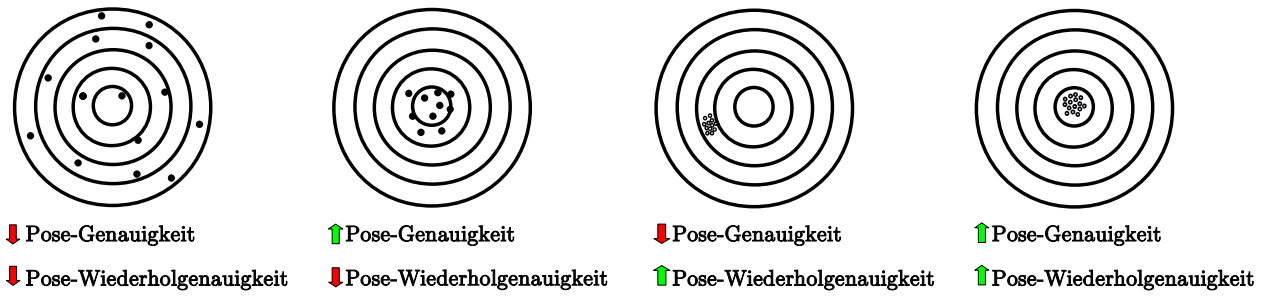


Abbildung 2.4.: Auswirkungen der Pose-Wiederholgenauigkeit bzw. der Pose-Genauigkeit [28]

2.2. Kalibration einer Roboterkinematik

Für die Kalibration einer Roboterkinematik, ist zunächst ein kinematisches Modell herzuleiten oder ein bestehendes zu erweitern. Hierbei sollten möglichst alle relevanten Zusammenhänge zwischen abtriebsseitigen Gelenkkoordinaten und kartesischen Koordinaten des TCPs innerhalb einer Vorwärts-Kinematik beschrieben werden. Grundlegend hierbei sind die Denavit-Hartenberg Parameter [13]. Bei Robotern mit nahezu parallel aufeinanderfolgenden Achsen sollte eine Erweiterung der DH-Parameter durch den Ansatz nach Hayati erfolgen [14]. Die zunächst genutzten Parameter entstammen den CAD-Daten des Roboters. Diese entsprechen aufgrund von Fertigungstoleranzen und der Montage nicht den Parametern, die die reale Roboterkinematik beschreiben. Dadurch resultieren die bereits beschriebenen Ungenauigkeiten bzgl. der Pose-Genauigkeit (siehe Abschnitt 2.1.1). Eine Vielzahl möglicher Ansätze zur Identifikation der realen Parameter ist dokumentiert worden [26; 16; 3; 28; 2]. Diese bereits bestehenden Ansätze wurden in einer zuvor angefertigten Projektarbeit genutzt, um Verfahren zur Kalibration der Roboterkinematik des MIRO zu entwickeln und zu erproben [19]. Die zwei dabei entstandenen Verfahren sollen hier kurz zusammengefasst werden, da sie als Grundlage für die weitere Arbeit dienen.

Beide Verfahren setzen die Nutzung eines externen Referenzmesssystems voraus, welches die Pose eines Targets am Endeffektor des Roboters bzgl. eines Referenztargets möglichst genau erfassen kann. Die Transformationen von dem Referenztarget zur Roboterbasis sollte konstant sein, wie auch die Transformation von dem TCP des Roboters zum Endeffektortarget. Die Steuerung des Roboters, während der Messwertaufnahme erfolgt mit einem Positionsregler.

Die in [19] entwickelten Kalibrationsverfahren dienen nur zur Identifikation der rein geometrischen Parameter. Zur Modellierung der Nulllagenfehler bzw. Gelenkoffsets und der Abweichung von der Orthogonalität der aufeinanderfolgenden Achsen dienen Rotationsmatrizen um die z_i - und x_i -Achse. Hierbei steht das i für das jeweilige Gelenk und λ mit entsprechendem Index kennzeichnet den Fehler bzw. die Abweichung von dem jeweiligen Parameter.

$$\mathbf{R}_{\Theta_i+q_i}(\lambda_{\Theta_i}) := \mathbf{R}(\Theta_i + q_i + \lambda_{\Theta_i}) = \begin{bmatrix} \cos(\Theta_i + q_i + \lambda_{\Theta_i}) & -\sin(\Theta_i + q_i + \lambda_{\Theta_i}) & 0 \\ \sin(\Theta_i + q_i + \lambda_{\Theta_i}) & \cos(\Theta_i + q_i + \lambda_{\Theta_i}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\mathbf{R}_{\alpha_{i-1}}(\lambda_{\alpha_{i-1}}) := \mathbf{R}(\alpha_{i-1} + \lambda_{\alpha_{i-1}}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_{i-1} + \lambda_{\alpha_{i-1}}) & -\sin(\alpha_{i-1} + \lambda_{\alpha_{i-1}}) \\ 0 & \sin(\alpha_{i-1} + \lambda_{\alpha_{i-1}}) & \cos(\alpha_{i-1} + \lambda_{\alpha_{i-1}}) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Zur Modellbildung der translatorischen Fehler, die in den DH-Parametern in a_{i-1} und d_i bzgl. der x- und y-Achse enthalten sind, dienen die Vektoren

$$\mathbf{t}_{a_{i-1}}(\lambda_{a_{i-1}}) := \mathbf{t}(a_{i-1} + \lambda_{a_{i-1}}) = \begin{bmatrix} a_{i-1} + \lambda_{a_{i-1}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad (2.22)$$

$$\mathbf{t}_{d_i}(\lambda_{d_i}) := \mathbf{t}(d_i + \lambda_{d_i}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_i + \lambda_{d_i} \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

Fasst man diese Fehler nun in einer Transformation zwischen zwei aufeinanderfolgenden Gelenken zusammen ergibt sich Gleichung (2.24), die im Anhang A.1 gelöst wird.

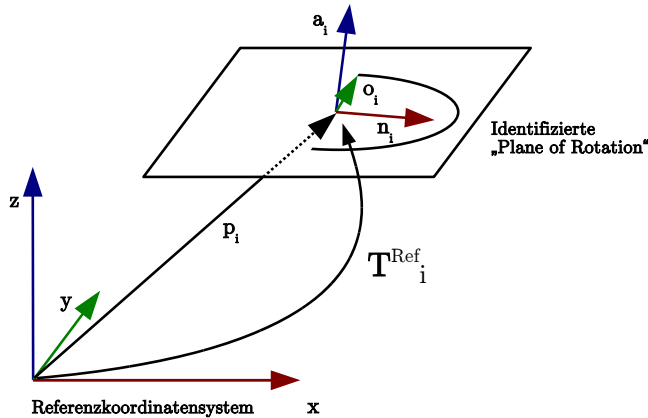
$$\mathbf{T}_1^{i-1}(\lambda) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{\alpha_{i-1}}(\lambda_{\alpha_{i-1}}) & \mathbf{t}_a(\lambda_{a_{i-1}}) \\ \underline{0} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{\Theta_i+q_i}(\lambda_{\Theta_i}) & \mathbf{t}_d(\lambda_{d_i}) \\ \underline{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Hierbei gilt: $\lambda = [\lambda_{\alpha_{i-1}}, \lambda_{\Theta_i}, \lambda_{a_{i-1}}, \lambda_{d_i}]$.

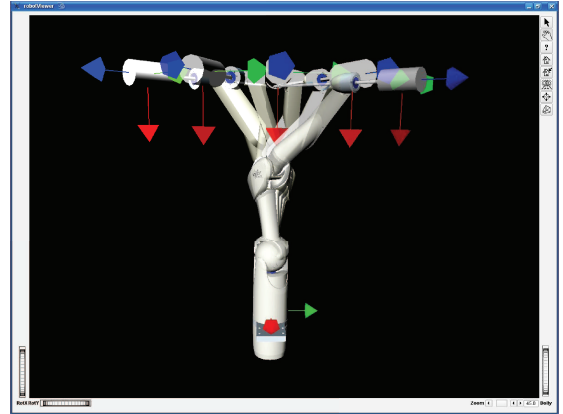
2.2.1. Einzelachskalibration - Kreisbogenanalyse

Bei der Kreisbogenanalyse handelt es sich um ein Verfahren, bei dem die Position und Orientierung der Gelenke schrittweise und einzeln erfolgt. Hierfür wird das Endeffektoratrget bzgl. des Referenztargets mit dem externen Messsystem vermessen. Während der Messung wird immer nur ein Gelenk zur Zeit rotiert, während die abtriebsseitige Position der anderen konstant gehalten wird. Hierdurch erhält man Kreisbögen. Diese liegen jeweils in einer Ebene bzw. **Plane of Rotation**. Durch die Berechnung der Normalen zur Ebene und des Kreismittelpunktes bzw. **Center of Rotation** ist es möglich die Transformation zum jeweiligen Gelenk bzgl. des Referenzkoordinatensystems zu ermitteln. Die Identifikation der Ebenennormalen und der Kreisparameter wird durch die Lösung linearer Minimierungsprobleme durch Singulärwertzerlegung bzw. QR-Zerlegung durchgeführt.

Abbildung 2.5 (a) zeigt schematisch einen gemessenen Kreisbogen bzgl. des Referenzkoordinatensystems, während einer Rotation eines einzelnen Gelenks. Desweiteren ist die zu identifizierende Ebene mit ihrer Normalen \mathbf{a}_i angedeutet. Die übrigen Einheitsvektoren \mathbf{n}_i und \mathbf{o}_i stellen die x- bzw. y-Achse des jeweiligen Koordinatensystems i dar. \mathbf{p}_i ist der Translationsvektor von dem Referenzkoordinatensystem zum Ursprung des Koordinatensystems i , der aus der Bestimmung des Kreismittelpunkts resultiert.



(a) Schematische Darstellung der Kreisbogenanalyse



(b) Rotation um Gelenk 1 des MIRO

Abbildung 2.5.: Schematische Darstellung der Kreisbogenanalyse zur Kalibration der Roboterkinematik [19]

Die Einheitsvektoren \mathbf{n}_i und \mathbf{o}_i lassen sich mit Hilfe der identifizierten Rotationsachsen oder Kreismittelpunkte der anderen Gelenke ermitteln. So ergeben sich die Transformationen vom Referenzkoordinatensystem zu den einzelnen Gelenkkoordinatensystemen des MIRO aus folgendem Zusammenhang.

$$\mathbf{T}_i^{Ref} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_i & \mathbf{o}_i & \mathbf{a}_i & \mathbf{p}_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{mit } i = 1, \dots, 7 \quad (2.25)$$

Die Transformationen zwischen den aufeinanderfolgenden Gelenken lassen sich durch

$$\mathbf{T}_i^{i-1} = (\mathbf{T}_{i-1}^{Ref})^{-1} \cdot \mathbf{T}_i^{Ref} \quad (2.26)$$

berechnen. Diese sind analog zu der Transformationsmatrizen, die mit Hilfe der DH-Parameter aufgestellt werden (siehe Gleichung (2.8)). Die Herleitung zielführender Gleichungen dient der analytischen Extrahierung der DH-Parameter.

$$\begin{aligned} a_{i-1} &= \mathbf{T}_i^{i-1}(1, 4), \\ \alpha_{i-1} &= \text{atan2} \left(\frac{-\mathbf{T}_i^{i-1}(2, 3)}{\mathbf{T}_i^{i-1}(3, 3)} \right), \\ d_i &= \sqrt{(\mathbf{T}_i^{i-1}(2, 4))^2 + (\mathbf{T}_i^{i-1}(3, 4))^2}, \\ \Theta_i &= \text{atan2} \left(\frac{-\mathbf{T}_i^{i-1}(1, 2)}{\mathbf{T}_i^{i-1}(1, 1)} \right) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Bei der Auswertung der Kreisbogenanalyse zeigte sich ein starker Einfluss der Gelenkelastizitäten. Diese spielen vor allem bei der Identifikation der Gelenke 2, 3, 4 und 6 des MIRO eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Der Beweis hierfür wurde in [19] durch eine anschließende Verifikation des Kalibrierungsergebnisses mittels eines Pose-Genauigkeitstests erbracht.

Aufgrunddessen, dass zur Durchführung der Kalibration nur die Messdaten des Referenzmesssystems herangezogen werden, ist die Kompensation dieses Einflusses nur mit hohem Aufwand durchführbar.

Dennoch wird die Kreisbogenanalyse im folgenden weiter genutzt um die konstanten Transformationen von dem Referenzkoordinatensystem zum Gelenk 1 \mathbf{T}_1^{Ref} und vom TCP des MIRO zum Target $\mathbf{T}_{Target}^{TCP}$ zu berechnen. Diese werden als Startwerte für das zweite Verfahren zur Kalibration der Roboterkinematik verwendet. Dieses basiert auf der Lösung eines nichtlinearen Minimierungsproblems, welche mit einer Optimierungsfunktion der Matlab-Optimization-Toolbox durchgeführt wird. Dieses Verfahren wird im folgenden zusammengefasst und soll später in dieser Arbeit erweitert werden.

2.2.2. Statische 6D-Kalibration

Die statische 6D-Kalibration liegt einem Open-Loop Verfahren zugrunde. Hierbei werden Roboterposen mit dem Referenzmesssystem sechsdimensional vermessen, so dass Position und Orientierung je Pose T_{Target}^{Ref} bekannt sind.

Währenddessen werden auch die Daten der Inline-Sensorik des Roboters aufgenommen, wie antriebsseitige Motorpositionen $\Theta_{\Theta,i}$ und abtriebsseitige Gelenkstellungen $\mathbf{q}_{poti,i}$, sowie die Drehmomente bzgl. der Gelenkachsen τ_i . Die antriebsseitige Motorposition $\Theta_{\Theta,i}$, bzgl. welcher die Positionsregelung durchgeführt wird, wird über die Positionsübertragungsmatrix und das Untersetzungsverhältnis auf die abtriebsseitige Position \mathbf{q}_{Θ_i} umgerechnet (siehe Anhang A.2). Über die Direkte-Kinematik werden die Transformationen \mathbf{T}_{TCP}^{Base} bzw. \mathbf{T}_{TCP}^1 berechnet. Die konstanten Transformationen \mathbf{T}_1^{Ref} und $\mathbf{T}_{Target}^{TCP}$ sind als Schätzwerte durch eine zuvor durchgeführte Kreisbogenanalyse, bei der das Setup des Experimentes identisch ist, bekannt. Diese werden benötigt, um die offene kinematische Kette zu schließen und eine Pose-Genauigkeitsuntersuchung durchzuführen (siehe Abschnitt 2.1.1). Abbildung 2.6 soll die kinematischen Zusammenhänge verdeutlichen. Das Referenzmesssystem basiert hier auf einer Koordinatenmessmaschine und wird mit CMM bezeichnet.

Die translatorischen und rotatorischen Fehler AP_p , AP_α , AP_β und AP_γ dienen der Herleitung einer Zielfunktion $f(\mathbf{p}_{Kin})$ mittels der Direkten Kinematik, die abhängig von den kinematischen Parametern \mathbf{p}_{Kin} ist. Die kinematischen Parameter enthalten die DH-Parameter und je konstanter Transformation 6 weitere Parameter. Diese Zielfunktion wird mittels einer nichtlinearen Optimierungsfunktion der Matlab-Optimization-Toolbox minimiert.

$$\min_{\mathbf{p}_{Kin}} f(\mathbf{p}_{Kin}) \quad (2.28)$$

Gemäß der Aufgabenstellung wird die kinematische Kalibration um Einflüsse der Gelenk- und Strukturelastizitäten erweitert. In Kapitel 4.1 wird die Zielfunktion detailliert hergeleitet und die Erweiterungen implementiert.

Zur Planung der zu vermessenen Posen wurde ein Planungsalgorithmus in Matlab implementiert, der die Randbedingungen des verwendeten Trackingsystems berücksichtigt. Desweiteren wird der gesamte Arbeitsraum χ des Roboters und dessen Redundanz ausgenutzt um die Posen in Gelenkkoordinaten zu erhalten. Die generierten Posen $\mathbf{q}_{KinCali}$ sollen der effizienten Anregung der zu identifizierenden Parameter dienen. Der Planungsalgorithmus wird im folgenden beschrieben.

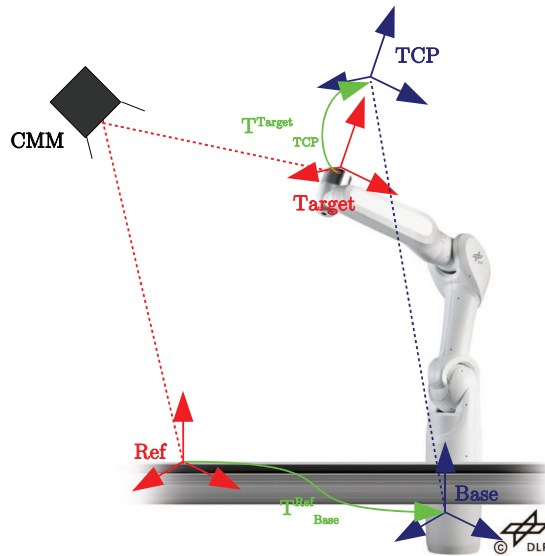


Abbildung 2.6.: Statische 6D-Kalibration

Als Eingabeparameter erhält der Posenplaner die Gelenkwinkelgrenzen, sowie die DH-Parameter nach Yoshikawa und Craig des verwendeten Roboters. Die Berechnung der kartesischen Posen \mathbf{T}_{TCP}^{Base} mittels der Direkten Kinematik $f(\mathbf{q})$ dient der Aufteilung der Kalibrationsposen über den gesamten Arbeitsraum. Durch eine weitere Übermittlung eines Teilungsverhältnisses bzgl. der Gelenkwinkelgrenzen, kann die Auflösung bei der Berechnung der Posen erfolgen.

Hierfür wird zunächst wird der Arbeitsraum χ des Roboters in einen Voxelraum χ_{voxel} aufgeteilt. Ein Voxel stellt hierbei einen Quader dar, dessen Seitenlänge p zusätzlich als Funktionsparameter übergeben werden kann. Der Voxelraum kann als Menge der kartesischen Grenzen des realen Arbeitsraums des Roboters in x-, y-, z-Richtung abhängig von der gewählten Seitenlänge eines Voxels definiert werden.

$$\chi_{voxel}(p) \in \begin{bmatrix} x_{lim,neg}, & x_{lim,neg} + p, & x_{lim,neg} + 2 \cdot p, & \dots, & x_{lim,pos} \\ y_{lim,neg}, & y_{lim,neg} + p, & y_{lim,neg} + 2 \cdot p, & \dots, & y_{lim,pos} \\ z_{lim,neg}, & z_{lim,neg} + p, & z_{lim,neg} + 2 \cdot p, & \dots, & z_{lim,pos} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Die Lage eines Voxels ist über einen Translationsvektor mit Ursprung in der Roboterbasis beschreibbar. Durch die Betrachtung des translatorischen Anteils $\mathbf{t}_{TCP}^{Base}(\mathbf{q})$ der kartesischen Pose kann die Lage der eingenommenen Pose einem Voxel eindeutig zugeordnet werden.

Jedem Voxel sollen 3 verschiedene Posen in Gelenkkordinaten $\mathbf{q}_{KinCali}$ zugeordnet werden. Das Kriterium, welches von allen Posen zu erfüllen ist, betrifft die Sichtbarkeit vom Trackingsystem. Die Sichtbarkeit eines Targets, welches hier identisch zum TCP des Roboters angenommen wird, ist abhängig von dessen Orientierung \mathbf{R}_{Cam}^{TCP} bzgl. des Koordinatensystems des Trackingsystems. Hierbei darf der Winkel ϕ_{krit} nicht überschritten werden. Durch das zuvor geplante experimentelle Setup, sollte die Orientierung des Koordinatensystems des Trackingsystems bzgl. der Roboterbasis mit \mathbf{R}_{Base}^{Cam} näherungsweise bekannt sein. Die Berechnung der Direkten Kinematik stellt die Orientierung $\mathbf{R}_{TCP}^{Base}(\mathbf{q})$ des TCPs bzgl. der Roboterbasis zur

Verfügung. Somit kann über die Achse-Winkeldarstellung einer Rotation durch folgenden Zusammenhang der Winkel zwischen den Orientierungen \mathbf{R}_{Base}^{Cam} und $\mathbf{R}_{TCP}^{Base}(\mathbf{q})$ berechnet werden.

$$\phi_{diff} = \cos \left(\frac{\text{spur}(\mathbf{R}_{Base}^{Cam} \cdot \mathbf{R}_{TCP}^{Base}(\mathbf{q}_{KinCali,j})) - 1}{2} \right) \quad (2.30)$$

Der immer geltende Anspruch an eine Pose ist somit wie folgt formuliert:

$$(i) \quad -\phi_{krit} < \phi(\mathbf{q}_{KinCali,j}) < \phi_{krit} \quad (2.31)$$

Nach der Berechnung einer Pose \mathbf{T}_{TCP}^{Base} wird zunächst geprüft, ob das erreichte Voxel bereits mit 3 Posen belegt ist. Dies wird über einen Zähler erreicht, der jedesmal hochgezählt wird, wenn eine Pose in einem Voxel abgelegt wird. Sollte dies nicht der Fall sein erfolgt die Überprüfung der Sichtbarkeit mittels Anspruch (i). Enthält das Voxel noch keine Pose und der Anspruch (i) ist erfüllt, wird die Pose $\mathbf{q}_{KinCali}$ in Gelenkkoordinaten in einen Vektor, der ebenso die Lage des Voxels enthält, abgelegt. Der Zähler wird entsprechend auf 1 erhöht.

Das Kriterium für die zweite Pose sieht eine stark abweichende Orientierung bzgl. derjenigen der bereits enthaltenen Pose vor. Hierbei ist der Funktion ein weiterer Parameter ϕ_O zu übergeben. Die Anforderung für eine der weiteren beiden Posen lautet wie folgt.

$$(ii) \quad |\phi(\mathbf{q}_{KinCali,j}) - \phi_O| \quad (2.32)$$

Die dritte Pose soll eine deutlich abweichende Gelenkconfiguration zu der ersten abgelegten Pose aufweisen. Der vom Anwender anzugebende Eingabeparameter lautet ϕ_q und wird mit den Differenzen der Gelenkwinkel der Gelenke 2 bis 7 verglichen. Der Anspruch für die dritte Pose lautet:

$$(iii) \quad |\phi(\mathbf{q}_{KinCali,j}) - \phi_q| \quad (2.33)$$

Auch bei der Auswertung der Experimente zur statischen 6D-Kalibration und der Verifikation der erhaltenen kinematischen Parameter zeigte sich ein starker Einfluss der Elastizitäten. Diesen Einfluss gilt es in dieser Arbeit mit in die Kalibration der Roboterkinematik einzubeziehen.

2.3. Roboterdynamik und Berechnung des Gravitationsmodells

Der Zusammenhang zwischen Lagen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen einzelner Roboterglieder einerseits, sowie Kräften und Momenten andererseits werden durch Bewegungsgleichungen beschrieben. Die allgemeine Form der Bewegungsgleichung für einen Roboter kann wie folgt formuliert werden.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{w} \quad (2.34)$$

Hierbei ist $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ die symmetrische und positiv definite $(6n \times n)$ -Trägheits- bzw. Massenmatrix, wobei n der Anzahl an Freiheitsgraden entspricht. Der $(6n \times 1)$ -Vektor der Zentrifugal- und Coriolisterme wird mit $\mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ symbolisiert und der Vektor der Gravitationsanteile gleicher Dimension mit $\mathbf{g}(\mathbf{q})$. Der resultierende Belastungsvektor \mathbf{w} ist ebenso ein $(6n \times 1)$ -Vektor und beinhaltet Kräfte und Momente, die an den Roboterjunkten angreifen.

Die Berechnung der Lage und Bewegung des Roboters $(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$, die aus den an den Gelenken anliegenden Momenten $\boldsymbol{\tau}$ resultieren, wird als direkte Dynamik bezeichnet. Die Lösung der nichtlinearen Differenzialgleichungen erfolgt beispielsweise über numerische Integration.

Als inverse Dynamik wird die Berechnung der Momente $\boldsymbol{\tau}$ mit gegebenen Bewegungen und Positionen des Roboters $(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$ bezeichnet und kann durch die Lösung von algebraischen Gleichungen erfolgen [15; 18]. Die allgemeine mathematische Formulierung der inversen Dynamik ist Gleichung (2.35) zu entnehmen.

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} = f(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \mathbf{l}_{ext}) \quad (2.35)$$

Alle in dieser Arbeit entwickelten Kalibrationsschritte setzen die Aufnahme von Messwerten im statischen Lastfall voraus. Für einen statischen Lastfall gelten folgende Annahmen:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}} &= \mathbf{0} \\ \ddot{\mathbf{q}} &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (2.36)$$

Aus diesem Grund wird im folgenden die Berechnung der Kräfte und Momente, die im oben genannten Lastfall bzgl. der einzelnen Gelenke resultieren, mittels eines angepassten rekursiven Newton-Algorithmus beschrieben [17]. Die vollständige Berechnung der dynamischen Gleichungen unter Einbezug der Zentrifugal- und Coriolisanteile $\mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, sowie der Beschleunigungen $\ddot{\mathbf{q}}$ mit der Trägheits- bzw. Massenmatrix $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ kann mit verschiedenen Verfahren durchgeführt werden. Die meist verwendeten Verfahren nutzen entweder die Lagrange'schen Gleichungen 2. Art, die auf den im System enthaltenen Energien basieren, oder die Newton-Euler Gleichungen, die den Impuls- und Drallsatz nutzen. Hierfür wird auf die Grundlagenliteratur verwiesen [7; 15; 18].

2.3.1. Rekursiver Newton-Algorithmus für den statischen Lastfall

Der Belastungsvektor \mathbf{w}_i setzt sich aus den 3 Kraftkomponenten zusammen, die in Richtung der Achsen des Koordinatensystems des Gelenks i wirken. Desweiteren sind die Drehmomente enthalten, die an die jeweiligen Achsen anliegen.

$$\mathbf{w}_i = [f_{i,x} \quad f_{i,y} \quad f_{i,z} \quad \tau_{i,x} \quad \tau_{i,y} \quad \tau_{i,z}]^T \quad \text{mit } i = 1, \dots, n \quad (2.37)$$

Hierbei ist n durch die Anzahl der Freiheitsgrade des Roboters definiert. Die Komponenten des Belastungsvektors bzgl. eines Gelenks i resultieren aus der Reaktion auf die Belastungen des darauffolgenden Roboterglieds, die durch die Gravitation hervorgerufen werden. Zusätzlich wirken sich die Belastungsvektoren weiter distal gelegener Gelenke aus. Die Transformation des Belastungsvektors von einem Koordinatensystem j zu einem anderen Koordinatensystem k erfolgt durch sogenannte *Screw-Transformationsmatrizen* $\mathbf{\Gamma}_k^j$ der Dimension (6×6) . Der mathematische Zusammenhang zwischen zwei Belastungsvektoren ergibt sich wie folgt:

$$\mathbf{w}_k = \mathbf{\Gamma}_k^j \cdot \mathbf{w}_j \quad (2.38)$$

Wobei die *Screw-Transformationsmatrix* Γ_k^j folgendermaßen definiert ist:

$$\Gamma_k^j = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_k^j & \mathbf{0} \\ \tilde{\mathbf{t}}_k^j \cdot \mathbf{R}_k^j & \mathbf{R}_k^j \end{bmatrix}. \quad (2.39)$$

Hierbei wird mit \mathbf{R}_k^j die Rotationsmatrix symbolisiert. $\tilde{\mathbf{t}}$ berechnet sich entsprechend einer schiefsymmetrischen Matrix zur Formulierung des Kreuzprodukts zu

$$\tilde{\mathbf{t}}_k^j = \begin{bmatrix} 0 & -t_{k,z}^j & t_{k,y}^j \\ t_{k,z}^j & 0 & -t_{k,x}^j \\ -t_{k,y}^j & t_{k,x}^j & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.40)$$

Die Komponenten entsprechen denjenigen des Translationsvektors zwischen den Koordinatensystemen j und k .

$$\mathbf{t}_k^j = [t_x \quad t_y \quad t_z]^T \quad (2.41)$$

Desweiteren ist der Gravitationsvektor \mathbf{g}_{Base} bzgl. der Roboterbasis über die Rotationsmatrizen \mathbf{R}_i^{Base} bzgl. des Koordinatensystems i umzurechnen. Jegliche kinematischen Zusammenhänge können mit der direkten Kinematik des Roboters berechnet werden, deren Parameter als bekannt vorausgesetzt werden.

$$\mathbf{g}_i = \mathbf{R}_i^{Base} \cdot \mathbf{g}_{Base} \quad (2.42)$$

Neben der als bekannt vorausgesetzten kinematischen Zusammenhänge und dem Gravitationsvektor bzgl. der Roboterbasis, müssen die Massen m_i der Roboterglieder und des möglichen Endeffektorwerkzeugs m_{n+1} , sowie die Massenschwerpunkte \mathbf{S}_i und \mathbf{S}_{n+1} dergleichen, bekannt sein. Der Belastungsvektor bzgl. des Massenschwerpunktes des Endeffektorwerkzeugs \mathbf{F}_{n+1} ergibt sich gemäß der folgenden Gleichung (2.43). Hierbei werden externe Belastungen \mathbf{l}_{ext} vernachlässigt.

$$\mathbf{w}_{n+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{n+1} \\ \boldsymbol{\tau}_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{n+1} \cdot \mathbf{g}_{n+1} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Durch eine iterative und rekursive Vorgehensweise vom distalsten Gelenk bis zur Roboterbasis gemäß Gleichung (2.44) lassen sich die Belastungsvektoren bzgl. der Gelenke des Roboters \mathbf{w}_i berechnen.

$$\mathbf{w}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_i \\ \boldsymbol{\tau}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_i \cdot \mathbf{g}_i \\ \mathbf{MS}_i \times \mathbf{g}_i \end{bmatrix} + (\Gamma_{i+1}^i)^T \cdot \mathbf{w}_{i+1}, \quad (2.44)$$

Hierbei ist \mathbf{MS}_i als

$$\mathbf{MS}_i = m_i \cdot \mathbf{S}_i \text{ mit } i = 1, \dots, n + 1 \quad (2.45)$$

definiert.

2.4. Identifikation der Massenparameter

In diesem Abschnitt werden die mathematischen Zusammenhänge vorgestellt, die zur Identifikation der Massenparameter verwendet werden können. Ein ähnliches Verfahren wird zur

Zeit am Institut für Robotik und Mechatronik angewandt um eine entsprechende Kalibration an den Leichtbaurobotern der dritten Generation (LBR III) durchzuführen [6; 18].

Zur Identifikation der Massenparameter, die die Massen und Massenschwerpunkte der einzelnen Glieder beinhalten, wird der oben beschriebene angepasste rekursive Newton-Algorithmus als lineares Gleichungssystem der Form

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (2.46)$$

formuliert. Hierbei ist \mathbf{A} die Koeffizientenmatrix, \mathbf{x} der Vektor der zu identifizierenden Parameter und \mathbf{b} ein Vektor der die Messwerte enthält. Der Vektor der zu identifizierenden Parameter ist wie folgt definiert.

$$\mathbf{x} = [m_1 \quad \mathbf{MS}_1 \quad \dots \quad m_n \quad \mathbf{MS}_n]^T \quad (2.47)$$

Auch hier entspricht n der Anzahl an Freiheitsgraden des Roboters. Die Hauptdiagonalelemente der oberen Dreiecksmatrix \mathbf{A}

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} & \mathbf{A}_{13} & \mathbf{A}_{14} & \mathbf{A}_{15} & \mathbf{A}_{16} & \mathbf{A}_{17} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{22} & \mathbf{A}_{23} & \mathbf{A}_{24} & \mathbf{A}_{25} & \mathbf{A}_{26} & \mathbf{A}_{27} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{33} & \mathbf{A}_{34} & \mathbf{A}_{35} & \mathbf{A}_{36} & \mathbf{A}_{37} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{44} & \mathbf{A}_{45} & \mathbf{A}_{46} & \mathbf{A}_{47} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{55} & \mathbf{A}_{56} & \mathbf{A}_{57} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{66} & \mathbf{A}_{67} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{77} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

ergeben sich entsprechend folgender Gleichung (2.49).

$$\mathbf{A}_{ii} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{g}}_i \end{bmatrix} \quad \text{mit } i = 1, \dots, n \quad (2.49)$$

Hierbei ergibt sich $\tilde{\mathbf{g}}_i$ analog zu (2.40). Die Haupt- und Nebendiagonalelemente haben die Dimension $[6 \times 4]$.

Der Vektor \mathbf{r} passt die Koeffizienten \mathbf{A}_{ii} den messbaren Belastungen an. Beim LBR III werden die Drehmomente um die Gelenkachsen gemessen. Somit wird $\mathbf{A}_{ii,r}$ mit Reduzierungsvektor \mathbf{r} gemäß Gleichung 2.51 angepasst und haben anschließend die Dimension $[1 \times 4]$.

$$\mathbf{A}_{ii,r} = \mathbf{r} \cdot \mathbf{A}_{ii} \quad (2.50)$$

$$\text{mit } \mathbf{r} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \quad (2.51)$$

Der Vektor \mathbf{b} ergibt sich wie folgt.

$$\mathbf{b} = [\tau_1 \quad \dots \quad \tau_n]^T \quad (2.52)$$

Die Nebendiagonalelemente ergeben sich zu

$$\mathbf{A}_{ij} = \left(\prod_{h=i+1}^j \mathbf{\Gamma}_h^{h-1} \right) \cdot \mathbf{A}_{ii} \quad \text{mit } j = i + 1, \dots, n \quad (2.53)$$

und können analog zu Gleichung 2.51 reduziert werden.

Die obigen Gleichungen beschreiben die Berechnung der um die Rotationsachsen der Gelenke wirkenden Momente für die Messwertaufnahme an einer Pose. Für zusätzliche Kalibrationsposen ergeben sich \mathbf{A}_{ges} und \mathbf{b}_{ges} zu

$$\mathbf{b}_{ges} = \begin{bmatrix} \tau(1) \\ \vdots \\ \tau(k) \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}_{ges} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(1) \\ \vdots \\ \mathbf{A}(k) \end{bmatrix} \quad \text{mit } k = \text{Anzahl der Kalibrationsposen} \quad (2.54)$$

Durch die Bildung der Pseudoinversen der Rechtecksmatrix \mathbf{A}_{ges} , kann das Gleichungssystem so umgestellt werden, dass eine Lösung für die zu identifizierenden Parameter nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate erfolgen kann.

$$\mathbf{x} = \underbrace{(\mathbf{A}_{ges}^T \cdot \mathbf{A}_{ges})^{-1} \cdot \mathbf{A}_{ges}^T}_{\text{Pseudoinverse}} \cdot \mathbf{b} \quad (2.55)$$

Bei der Identifikation der Massenparameter sind zudem die identifizierbaren Parameter zu berechnen. Dies kann für einen Roboter wie den LBR III mittels eines Verfahrens nach Khalil erfolgen [18]. Dieses Verfahren beinhaltet bestimmte Regeln zur Entscheidung, ob ein Parameter vollständig identifizierbar, in Linearkombinationen identifizierbar oder nicht identifizierbar ist. Aufgrund der Drehmomentensensoren des MIRO, die nicht direkt in jedem Roboter-gelenk integriert sind, kann dieses Verfahren nicht verwendet werden und soll darum nicht näher erläutert werden. Über ein anderes Verfahren ist es möglich die identifizierbaren Parameter über die Eigenwerte der Jacobi-Matrix zu determinieren, die sich durch die partiellen Ableitungen des linearen Gleichungssystems der Form

$$\mathbf{e} = \mathbf{A}_{ges} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{b}_{ges} \quad (2.56)$$

ergibt. Hierbei ist \mathbf{e} ein $(nN \times 1)$ -Vektor, der die Fehler enthält, die bei der Nutzung falscher Parameter auftreten. Die $(nN \times 4n)$ -Jacobi-Matrix ergibt sich somit gemäß Gleichung (2.57).

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{x}} \quad (2.57)$$

Nach einer QR-Zerlegung der Jacobi-Matrix \mathbf{J} können die Hauptdiagonalelemente der Matrix \mathbf{R} genutzt werden, um die nicht identifizierbaren Parameter des Minimierungsproblems zu bestimmen. Das Kriterium, welches von Khalil vorgeschlagen wird, ab wann ein Parameter nicht identifizierbar ist, ergibt sich aus dem Produkt der Anzahl der Zeilen der Jacobi-Matrix r mit der numerischen Genauigkeit ϵ des Datentyps, der zur Berechnung verwendet wird, und dem Betrag des maximalen Hauptdiagonalelementes $\max(|\mathbf{R}_{ii}|)$ der R-Matrix.

$$\nu = r \cdot \epsilon \cdot \max(|\mathbf{R}_{ii}|) \quad (2.58)$$

Ist der Betrag eines Hauptdiagonalelements von \mathbf{R} kleiner als ν ($|R_{ii}| < \nu$) ist der Parameter i nicht identifizierbar.

Die Singulärwertzerlegung der, um die nicht identifizierbaren Parameter reduzierte, Jacobi-Matrix liefert die Singulärwerte. Die Konditionierung ergibt sich nach Khalil [18] durch die Division des maximalen Singulärwertes mit dem minimalen Singulärwert.

$$c(\mathbf{J}) = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \quad (2.59)$$

Da die Singulärwerte definitionsgemäß positiv sind, ergibt sich als minimale Konditionierung $c(\mathbf{J}) = 1$. Entspricht die Konditionierung diesem minimalen Wert, heißt das, dass jeder zu identifizierende Parameter mit gleicher Güte determiniert werden kann. Daraus ergibt sich, dass je näher die Konditionierung der Zahl 1 ist, desto besser ist das Minimierungsproblem konditioniert.

3. Komponenten des Gesamtsystems

In diesem Abschnitt werden alle Hard- und Softwarekomponenten vorgestellt, die bei der Durchführung dieser Arbeit genutzt werden. Zunächst wird das mechatronische Konzept, die Sensorik und die bisherigen Identifikationsmethoden für den medizinischen Leichtbauroboter MIRO vorgestellt. Daraufhin befasst sich der Abschnitt 3.2 mit dem Referenzmesssystem Krypton K600. Im Anschluss daran wird die grundlegende Funktionsweise des Trägheitssensors der Firma Xsens erläutert. Dieser dient zur Überwachung der Messungen und der Bestimmung des Gravitationsvektors bzgl. der Roboterbasis.

3.1. Medizinischer Leichtbauroboter MIRO

Bei der Entwicklung des medizinischen Leichtbauroboters MIRO wurden im voraus einige Designkriterien formuliert [10]. Zum einen sollte der MIRO vielseitig in der Medizintechnik bzw. der robotergestützten Chirurgie einsetzbar sein. Hierfür wurde unter anderem die redundante Kinematik für eine Vielzahl an operativen Eingriffen optimiert. Zum anderen sollte die Akzeptanz durch die zukünftigen Anwender des Systems immer im Vordergrund bei der Entwicklung stehen. Dies führte zu der kompakten und schlanken Leichtbauweise des MIRO. Hierdurch ist die Integration in einen Operationssaal schnell und platzsparend möglich. Ein anthropomorphes Armdesign soll das Verständnis für das System von der Anwenderseite fördern. Desweiteren sorgt die interne Sensorik, wie auch die geringen bewegten Massen des Leichtbauroboters, zu der Möglichkeit eine sichere Mensch-Maschine-Interaktion zu gewährleisten [5].

3.1.1. Mechatronisches Konzept

Der MIRO hat 7 Freiheitsgrade. Diese werden in sieben rotatorischen Gelenken umgesetzt. Das Gelenk 1 sorgt für die Dreh-Bewegung des Schultergelenks des anthropomorphen Leichtbauroboters (Roll). Darauf folgt ein Koppelgelenk mit den Freiheiten Pitch und Yaw um die Achsen 2 und 3 des Schultergelenks. Bei Koppelgelenken können, aufgrund der Nähe zweier Gelenke, die elektronischen Komponenten reduziert werden. Dies kommt dem kompakten Design zugute. Das Ellenbogengelenk(Pitch-Roll) mit den Achsen 4 und 5 ist ebenso als Koppelgelenk ausgeführt, wie auch das Handgelenk(Pitch-Roll) mit den Achsen 6 und 7. Die redundante Kinematik des MIRO wird in Abbildung 3.1 verdeutlicht und deren DH-Parameter in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1.: DH-Parameter des MIRO

| i | a_{i-1} | α_{i-1} | d_i | Θ_i |
|-----|-----------|----------------|-------|------------|
| 1 | 0 | 0 | 208mm | 0 |
| 2 | 0 | $-\pi/2$ | 0 | $-\pi/2$ |
| 3 | 0 | $\pi/2$ | 0 | 0 |
| 4 | 310mm | $-\pi/2$ | 0 | $\pi/2$ |
| 5 | 0 | $\pi/2$ | 385mm | 0 |
| 6 | 0 | $-\pi/2$ | 0 | 0 |
| 7 | 0 | $\pi/2$ | 200mm | 0 |

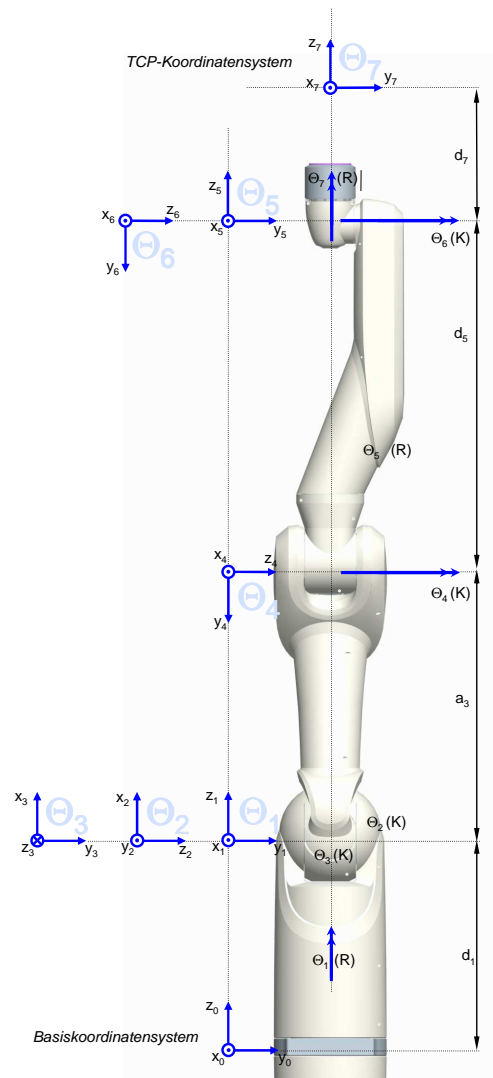


Abbildung 3.1.: Die Koordinatensysteme des MIRO [10]

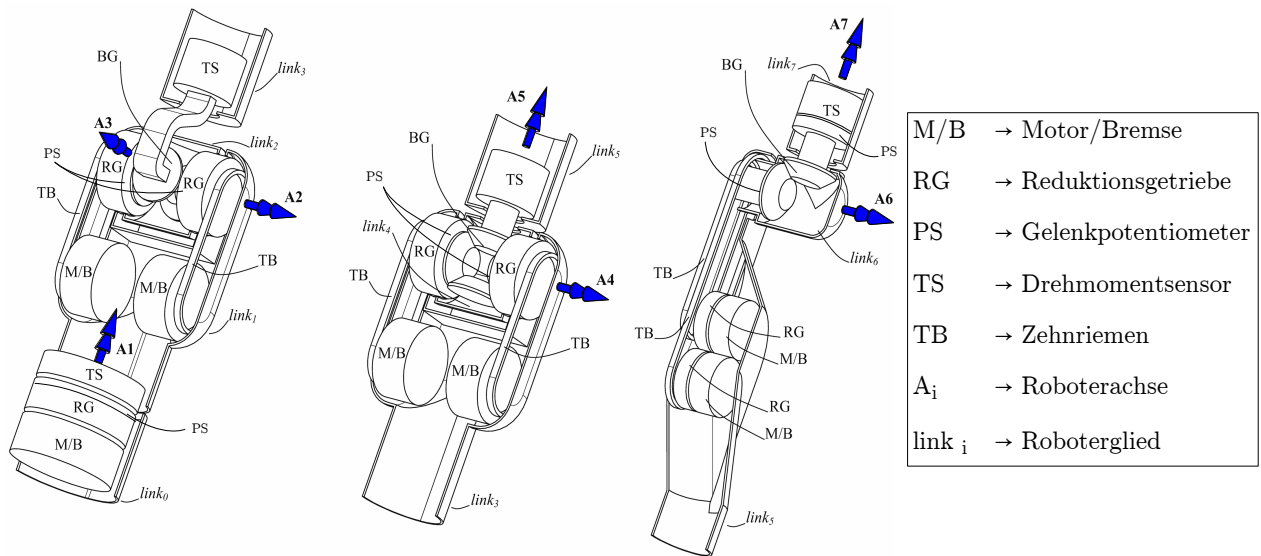


Abbildung 3.2.: Schultergelenk 1, 2, 3 (links), Ellenbogengelenk 4, 5 (Mitte), Handgelenk 6,7 (Rechts) [10]

Die Funktionsweise der Gelenke wird im folgenden anhand des Schultergelenks beschrieben. Die Gelenke sind in Abbildung 3.2 dargestellt.

Das erste Roboterglied(link 1) wird durch einen Motor(M/B) über ein Untersetzungsgetriebe(RG) des Harmonic-Drive-Prinzips mit einem Untersetzungsverhältnis von $\frac{1}{100}$ aktuiert. Jeder Motor ist mit Sicherheitsbremsen ausgestattet, die auf elektro-mechanischer Aktuierung und Reibschluss basieren. Die Bremsen dienen dem Halten einer Pose, wenn die Stromversorgung getrennt ist. Desweiteren sollen sie das Anhalten des Roboters in einer Notfallsituation gewährleisten. Im Betriebszustand werden die Sicherheitsbremsen nicht benötigt. Hier stellen die Motoren, auch im statischen Lastfall, das nötige Reaktionsmoment auf die Gravitation zur Verfügung. Neben den Sicherheitsbremsen sind alle Motoren mit einem magnetoresistiven Positionssensor(nicht dargestellt) ausgestattet. Dieser dient der elektrischen Regelung des bürstenlosen Motors. Desweiteren werden die Motorpositionen über die Getriebeuntersetzungen auf den Abtrieb umgerechnet. Die hieraus resultierenden abtriebsseitigen Gelenkpositionen finden in der Roboterregelung Verwendung. Die Genauigkeit des MR-Sensors wird vom Hersteller mit $\pm 0.06^\circ$ bei Motordrehzahlen von 7000 Umdrehungen pro Minute angegeben. Zur Bereitstellung der absoluten abtriebsseitigen Position der Robotergelenke in der Initialisierungsphase des Roboters ist zusätzlich je Gelenk ein abtriebsseitiges Schleif-Potentiometer(PS) integriert. Das Messprinzip basiert auf der Widerstandsänderung aufgrund der Veränderung der Länge einer Leiterbahn. Die Genauigkeit ist durch das Signal-Rausch-Verhältnis limitiert und die Linearität des Sensormodells beträgt $\pm 0.1\%$. Die Übertragung des Drehmomentes von dem Roboterglied 0 (link 0) auf das Roboterglied 1 (link 1) erfolgt über einen Drehmomentensensor(TS). Hier basiert das Messprinzip auf Dehnungsmessstreifen¹, die auf eigens entwickelten Sensorkörpern angeordnet sind. Durch die Schaltung von vier DMS zu einer Vollbrückenschaltung können die anliegenden skalierten Spannungen zur Berechnung

¹Abk.: DMS

der Drehmomente genutzt werden. Die Messung der Drehmomente ist um jede Gelenkachse möglich. Dies lässt innovative Regelungskonzepte, wie die Drehmomentenregelung oder Impedanzregelung zu. Desweiteren ist es möglich, externe Kräfte zu lokalisieren und in Betrag und Richtung abzuschätzen. In Abschnitt 3.1.2 wird detaillierter auf die Funktionsweise und den Aufbau der gesamten Drehmomentensensorik eingegangen.

Am distalen Ende von Roboterglied 1 ist das Koppelgelenk 2/3 integriert, welches für die Aktuierung der Roboterglieder 2 und 3 (link 2 bzw. 3) sorgt. Die hierfür notwendigen Antriebsmomente werden durch zwei gegenüberliegende Motoren(M/B) bereitgestellt. Diese werden über Zahnriemen(TB) und Untersetzungsgetriebe (RG) auf ein kardanisches Kegeldifferential übertragen, welches die Drehmomente auf die beiden folgenden Glieder verteilt. Der Drehmomentensensor wurde aus Platzgründen in Roboterglied 3 (link 3) integriert. Aus diesem Grund werden die Momente um die Achse 2 und 3 (A2 bzw. A3), wie auch um Achse 4 (A4) und Achse 6 (A6) nur näherungsweise gemessen.

Zur Vermeidung einer Beschädigung des Roboters durch überschreiten der mechanischen Gelenkansschläge dienen virtuelle Gelenkgrenzen. Diese werden softwareseitig hinterlegt. Bei Näherung einer Gelenkposition an eine virtuelle Grenze kann durch verschiedene Reaktionsmechanismen die Einhaltung der Grenzen gewährleistet werden. Tabelle 3.2 gibt die mechanischen und virtuellen Gelenkansschläge an.

Tabelle 3.2.: Mechanische und virtuelle Gelenkansschläge

| i | mechanisch | | virtuell | |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | $q_{i,min}$ in [°] | $q_{i,max}$ in [°] | $q_{i,min}$ in [°] | $q_{i,max}$ in [°] |
| 1 | -172.50 | 172.50 | -162.50 | 162.50 |
| 2 | -51.00 | 51.00 | -41.00 | 41.00 |
| 3 | -51.00 | 51.00 | -41.00 | 41.00 |
| 4 | -57.00 | 127.00 | -47.00 | 117.00 |
| 5 | -172.50 | 172.50 | -162.50 | 162.50 |
| 6 | -165.00 | 165.00 | -160.00 | 160.00 |
| 7 | -172.50 | 172.50 | -162.50 | 162.50 |

3.1.2. Roboterinterne Drehmomentensensorik des MIRO

Die Sensoren zur Drehmomentendetektion des MIRO basieren auf der Verwendung von Dehnungsmessstreifen (Abbildung 3.3a). Aufgrund der geringen Abmessungen und der einfachen, kompakten Signalverarbeitungselektronik passen sie in das Konzept des MIRO. Zudem kann bei DMS ein lineares Sensormodell zur Beschreibung genutzt werden.

Das Messprinzip basiert auf der Widerstandsänderung eines Leiters infolge mechanischer Dehnung. Dies beruht auf der Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes aufgrund seiner geometrischen Ausmaße, wie Gleichung (3.1) verdeutlicht.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (3.1)$$

Hier ist ρ der materialspezifische elektrische Widerstand eines Leiters [Ωm]. l bezeichnet die Länge des Leiters in [m] und A ist die Querschnittsfläche in [m^2]. Dehnt sich nun das Material aufgrund mechanischer Einflüsse, resultiert eine Längenänderung $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ und eine Einschnürung des Querschnitts durch die Querkontraktion des Materials. Die Querkontraktion beschreibt das Verhältnis zwischen Querdehnung und Längsdehnung. Zur Detektion der Widerstandsänderung setzt man Wheatstone'sche Brückenschaltungen ein (Abbildung 3.3b).

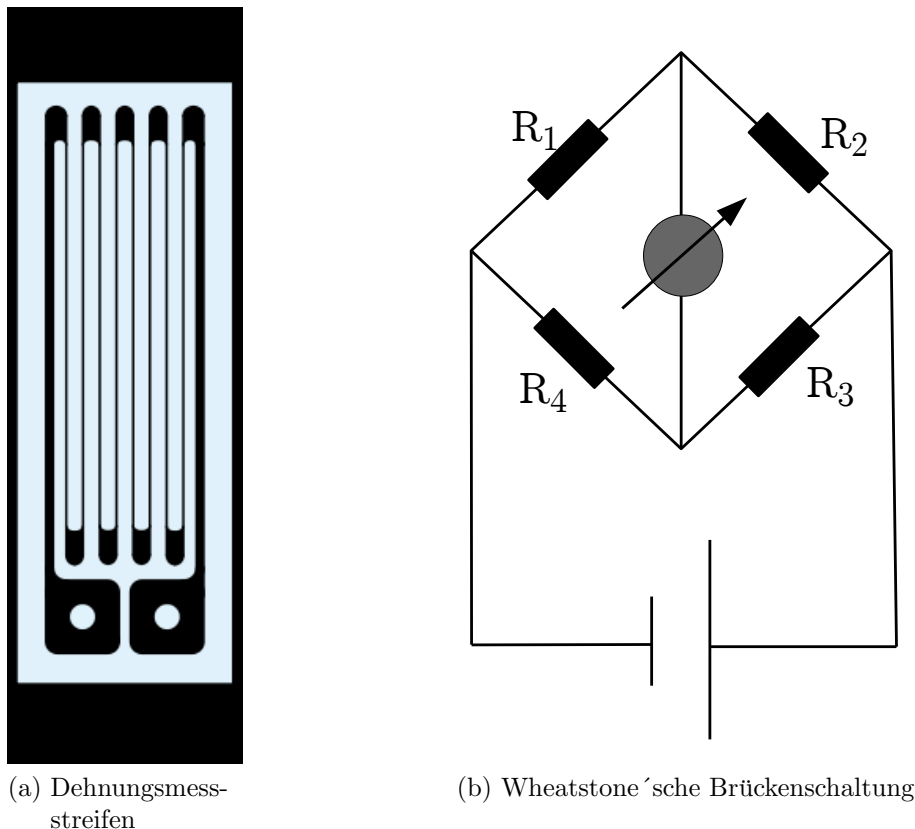


Abbildung 3.3.: Messprinzip der Drehmomentensensorik des MIRO

Sind die Widerstände aller Brückenzweige identisch fließt in der Brückendiagonale kein Strom. Ersetzt man nun 1, 2 oder alle Widerstände mit DMS erhält man eine Viertel-, Halb- bzw. Vollbrückenschaltung. Der Strom bzw. die Spannung in der Brückendiagonale ist nun proportional zur Dehnung. Durch ein Voltmeter kann die Spannung detektiert werden. Diese kann daraufhin genutzt werden um das anliegende Drehmoment, welches wiederum proportional zur Dehnung ist, zu berechnen. Eine Abweichung des Sensorwertes durch Temperatureinflüsse kann durch die Anpassung des Materials des DMS zu dem eigentlichen Sensorkörper kompensiert werden. Die Sensorkörper wurden speziell ausgelegt und mittels der Methode der Finiten Elemente² auf eine Überlastkapazität von 200% optimiert .

Durch den Aufbau der Gelenke des MIRO mit der Antriebseinheit, der Abtriebsseite und den Drehmomentensensoren (siehe Abbildung 3.2 und 3.4) sollten drei Koordinatensysteme je

²Abk.: FEM

Gelenk, zur eindeutigen Zuordnung, verwendet werden. \mathbf{KS}_Θ symbolisiert hierbei das antriebs- oder motorseitige Koordinatensystem. Hier wird die Motorposition Θ_i gemessen. Das zweite Koordinatensystem wird mit \mathbf{KS}_q bezeichnet und beschreibt das gelenk- oder abtriebsseitige Koordinatensystem. Hier wird durch die Schleifpotis \mathbf{q}_{poti} gemessen und zur Verfügung gestellt. Das Koordinatensystem bzgl. der Drehmomentensensoren wird als \mathbf{KS}_τ bezeichnet, während $\tau_{i,s}$ gemessen wird.

Die Drehmomente um die Achsen der Robotergelenke 1, 5 und 7 können redundant mittels jeweils zwei Vollbrückenschaltungen gemessen werden, die um 90° versetzt auf den drei entsprechenden Sensorkörpern angeordnet sind. Um die Achsen der Robotergelenke 2 und 3 wird je ein Drehmoment durch je eine Vollbrückenschaltung gemessen. Bei den Achsen der Gelenke 4 und 6 wird das jeweilige Drehmoment über eine Vektoraddition bestimmt. Hierbei werden die gemessenen Drehmomente $\tau_{4,s,1}$ und $\tau_{4,s,2}$ bzw. $\tau_{6,s,1}$ und $\tau_{6,s,2}$ entsprechend Abbildung 3.4 verwendet.

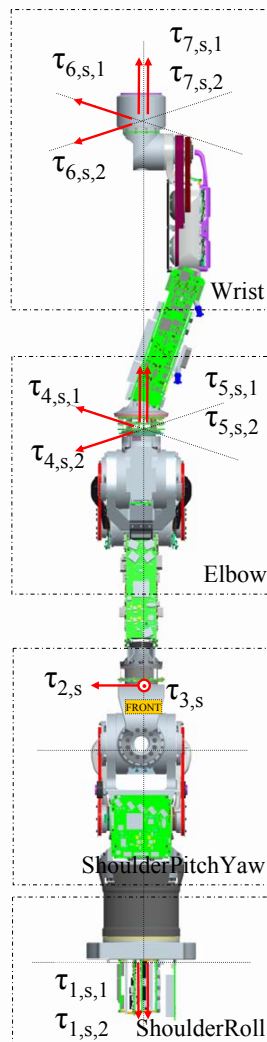


Abbildung 3.4.: Drehmomentensensorik beim MIRO

Durch die Annahme der Linearität einer Vollbrückenschaltung ergeben sich die Momente $\tau_{i,s,m}$ im Koordinatensystem des Drehmomentensensors gemäß folgender Gleichung (3.2).

$$\tau_{i,s,m} = k_{i,m} \cdot U_{i,m} + \tau_{off,i,s,m} \text{ mit } i = 1, \dots, 7 \text{ und } m = 1, 2 \quad (3.2)$$

Hierbei wird mit $k_{i,m}$ die Sensorverstärkung symbolisiert, die die Umrechnung von Spannungswerten der Einheit [V] in mechanische Größen der Einheit [Nm] ermöglicht. Die Sensorverstärkung ist analog zu der Steigung einer Geraden. Das Sensoroffset wird mit $\tau_{off,i,s,m}$ symbolisiert und kann aus den permanenten Dehnungen resultieren, die durch die Montage aufgebracht wurden. Das Sensoroffset ist analog zum y-Achsenabschnitt einer Geraden. Bei der Umrechnung nach obiger Formel ist zu beachten, dass bei τ_{2s} und τ_{3s} kein Index m existiert, sodass dieser hier ignoriert werden muss.

Die Vorschrift zur Berechnung der Drehmomente um die Gelenkachsen im \mathbf{KS}_τ wird in folgender Gleichung angegeben.

$$\begin{bmatrix} \tau_{1,s} \\ \tau_{2,s} \\ \tau_{3,s} \\ \tau_{4,s} \\ \tau_{5,s} \\ \tau_{6,s} \\ \tau_{7,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\tau_{1,s,1} + \tau_{1,s,2})/2 \\ -\tau_{2,s} \\ -\tau_{3,s} \\ -(\tau_{4,s,1} \cdot \cos(q_5 - \pi/4) - \tau_{4,s,2} \cdot \sin(q_5 - \pi/4)) \\ -(\tau_{5,s,1} + \tau_{5,s,2})/2 \\ -(\tau_{6,s,1} \cdot \cos(q_7 - \pi/4) - \tau_{6,s,2} \cdot \sin(q_7 - \pi/4)) \\ -(\tau_{7,s,1} + \tau_{7,s,2})/2 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Hierbei ist zu beachten, dass die redundante Messung der Drehmomente bzgl. der Gelenke 1, 5 und 7 verwendet wird, um durch die Mittelwertbildung der beiden gemessenen Sensorwerte die Auflösung zu steigern. Durch die Lage der Vollbrückenschaltungen des Drehmomentensensors 4/5 und 6/7 bzgl. der 4 und 6 Achse ist es möglich, zusätzlich die Quermomente $\tau_{4,s,\perp}$ und $\tau_{6,s,\perp}$ zu berechnen. Dies erfolgt durch die Veränderung der Berechnung der Vektoraddition mit $\frac{3\pi}{4}$, wie folgende Gleichung 3.4 verdeutlicht.

$$\begin{bmatrix} \tau_{4,s,\perp} \\ \tau_{6,s,\perp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\tau_{4,s,1} \cdot \cos(q_5 - 3\pi/4) - \tau_{4,s,2} \cdot \sin(q_5 - 3\pi/4)) \\ -(\tau_{6,s,1} \cdot \cos(q_7 - 3\pi/4) - \tau_{6,s,2} \cdot \sin(q_7 - 3\pi/4)) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Die Drehmomentensensoren können nur Belastungen erfassen, die an ihrem distalen Strukturteil angreifen. Da die Gelenkkoordinatensysteme \mathbf{KS}_q der Gelenke 2, 3, 4 und 6 des MIRO nicht den Koordinatensystemen der Drehmomentensensoren \mathbf{KS}_τ entsprechen, können die zur Regelung benötigten Drehmomente im Gelenkkoordinatensystem nicht direkt gemessen werden. Zur näherungsweisen Berechnung der Drehmomente dient folgende Formel:

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_s + (\mathbf{g}(\mathbf{q}) - \mathbf{g}_s(\mathbf{q})) \quad (3.5)$$

Hier steht das $\boldsymbol{\tau}$ für das Drehmoment im Gelenkkoordinatensystem \mathbf{KS}_q und $\boldsymbol{\tau}_s$ für das gemessene Drehmoment im Sensorkoordinatensystem \mathbf{KS}_τ . Die Graviationsanteile der Drehmomente im Gelenk- bzw. Sensorkoordinatensystem werden mit $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ und $\mathbf{g}_s(\mathbf{q})$ bezeichnet und über das Robotermodell berechnet (siehe Abschnitt 2.3.1).

Zur Vermeidung der Beschädigung der Drehmomentensensoren werden virtuelle Belastungsgrenzen softwareseitig implementiert. Tabelle 3.3 gibt diese Belastungsgrenzen an.

Tabelle 3.3.: Vorgegebene Belastungsgrenzen der Drehmomentensensoren im Gelenkkoordinatensystem

| i | $\tau_{i,min}$ in [Nm] | $\tau_{i,max}$ in [Nm] |
|---|------------------------|------------------------|
| 1 | -60.00 | 60.00 |
| 2 | -60.00 | 60.00 |
| 3 | -60.00 | 60.00 |
| 4 | -40.00 | 40.00 |
| 5 | -10.00 | 10.00 |
| 6 | -40.00 | 40.00 |
| 7 | -10.00 | 10.00 |

3.1.3. Kommunikation und Rechnerstruktur

Die Ansteuerung des MIRO erfolgt über Simulink-Modelle. Diese Applikationen werden auf einem Standard-Rechner mit dem Betriebssystem Linux entwickelt. Durch den Realtime-Workshop von Matlab/Simulink wird ein echtzeitfähiger Code erzeugt. Dieser wird auf einem Rechner mit dem Betriebssystem QNX gestartet, der mit 1 kHz getaktet ist. Die beiden Anwendungen kommunizieren über Ethernet mit einem am DLR entwickelten Ard-Netz. Ein weiterer QNX-Rechner führt die Roboterregelung mit einer 3 kHz Taktung durch. Dieser tauscht die Soll- und Istzustände des Roboters mit dem QNX-Rechner(1 kHz) über shared memories via Ard Netz aus. Abbildung 3.5a soll die Zusammenhänge verdeutlichen. Zur Über-

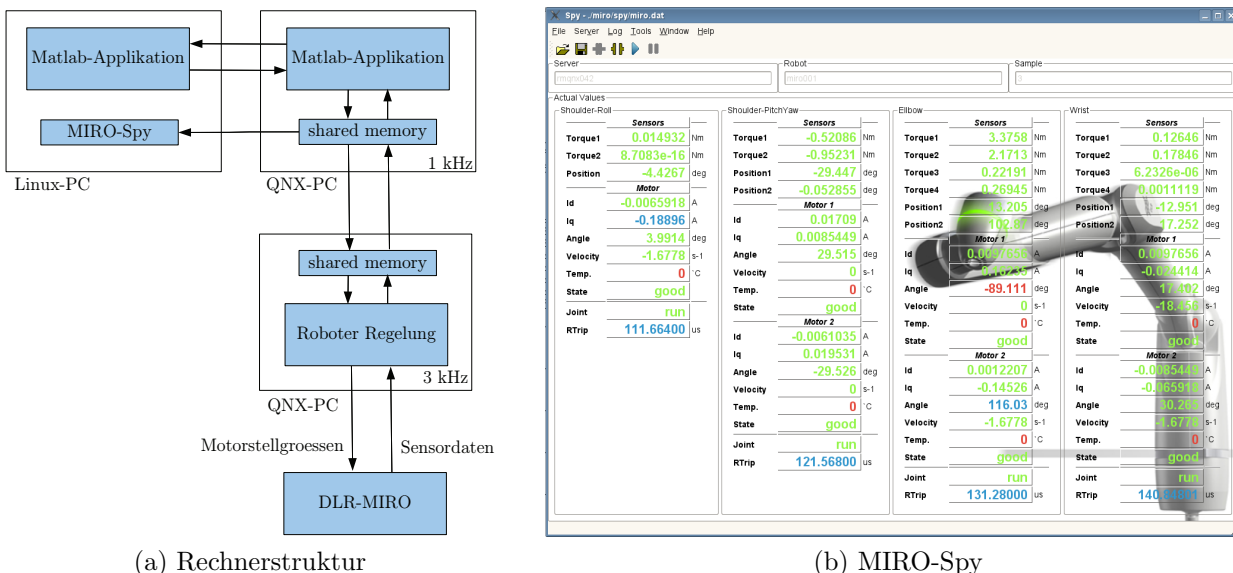


Abbildung 3.5.: Kommunikation und Rechnerstruktur, sowie Überwachung der Zustände des Roboters

wachung der Roboterzustände kommunizieren die beiden Matlab-Applikation (Linux-PC ↔

QNX-PC(1 kHz)) direkt miteinander. Zusätzlich dient ein Visualisierungstool, der MIRO-Spy, der Überwachung (Abbildung 3.5b).

3.1.4. Identifikation der Gelenkparameter und Kalibration der Drehmomentensensorik

Die Identifikation der Gelenkelastizitäten und Dämpfungskoeffizienten von Robotergelenken wird häufig über die Analyse des Schwingungsverhaltens durchgeführt. Bei Industrierobotern wird gelenkweise und in zusammengebautem Zustand vorgegangen. Zur Anregung einer Schwingung in einem Gelenk, wird dieses Gelenk rotiert und bei einer definierten Position die Bremse aktiviert. Durch den Geschwindigkeitssprung beginnt das Gelenk zu schwingen. Durch die Wahl einer geeigneten Konfiguration der übrigen Gelenke können verkoppelte Schwingungen aufgrund der hohen Trägheit der Roboterglieder vermieden werden. Die Wahl sollte so getroffen werden, dass die übrigen Gelenke senkrecht zu dem zu identifizierenden Gelenk stehen. Bei Leichtbaurobotern wie dem LBR oder MIRO kann diese Schwingungsentkopplung nur mäßig zu Erfolg führen. Dies liegt an den sehr geringen Trägheiten aufgrund der Leichtbauweise, sowie den hohen Elastizitäten. Aus diesem Grund werden die Gelenkelastizitäten und Dämpfungskoeffizienten der Gelenke der DLR-Leichtbauroboter auf einem Gelenkidentifikationsprüfstand, wie in Abbildung 3.6 dargestellt, durchgeführt. Durch die hausinterne Fertigung am DLR und anschließende Montage der Gelenke kann ein unverhältnismäßiger Aufwand vermieden werden [4].



Abbildung 3.6.: Gelenkidentifikationsprüfstand zur Identifikation der Gelenkparameter beim LBR [4]

Im folgenden wird das Verfahren zur Identifikation der Gelenke des MIRO vorgestellt, das zur Zeit Verwendung findet. Auch die Kalibration der Drehmomentensensorik wird beim MIRO auf dem Gelenkidentifikationsprüfstand durchgeführt, worauf im Anschluss eingegangen wird.

Identifikation der Gelenkparameter

Bei der Identifikation der Gelenkelastizitäten und Dämpfungskoeffizienten werden beim MIRO die antriebsseitige Positionsmessung und die Daten der Drehmomentensensoren genutzt. Die abtriebsseitige Positionssensorik ist aufgrund ihrer geringen Genauigkeit nicht geeignet. Die Last mit der die Gelenke auf dem Prüfstand versehen werden, wird für jedes Gelenk entsprechend der weiter distal liegenden Elemente der kinematischen Kette angepasst.

In der Tabelle 3.4 werden die maximalen Drehmomente aufgeführt, die im statischen Lastfall auf dem Gelenkidentifikationsprüfstand aufgebracht werden können.

Tabelle 3.4.: Maximale Belastung der Drehmomentensensoren im Gelenkkoordinatensystem auf dem Gelenkidentifikationsprüfstand

| i | $\tau_{i,max}$ in [Nm] |
|---|------------------------|
| 1 | 11.18 |
| 2 | 18.40 |
| 3 | 18.40 |
| 4 | 17.83 |
| 5 | 7.84 |
| 6 | 3.32 |
| 7 | 1.63 |

Die Identifikation des seriellen Gelenks 1 erfolgt, indem das Gelenk an verschiedenen Positionen in dessen Arbeitsraum zu Schwingungen angeregt wird und entsprechende Messwerte aufgenommen werden. In Gleichung (3.6) sind die nötigen dynamischen Gleichungen beschrieben. Abbildung 3.7 zeigt die automatisierte Schwingungsmessung in unterschiedlichen Gelenkpositionen zur Bestimmung der Gelenkelastizität und -dämpfung.

$$\begin{aligned}\tau_1 + dk^{-1}\dot{\tau} &= m\ddot{q}_1 + mgs \cdot \sin q_1 \\ \tau_1 &= k(\Theta_1 - q_1)\end{aligned}\tag{3.6}$$

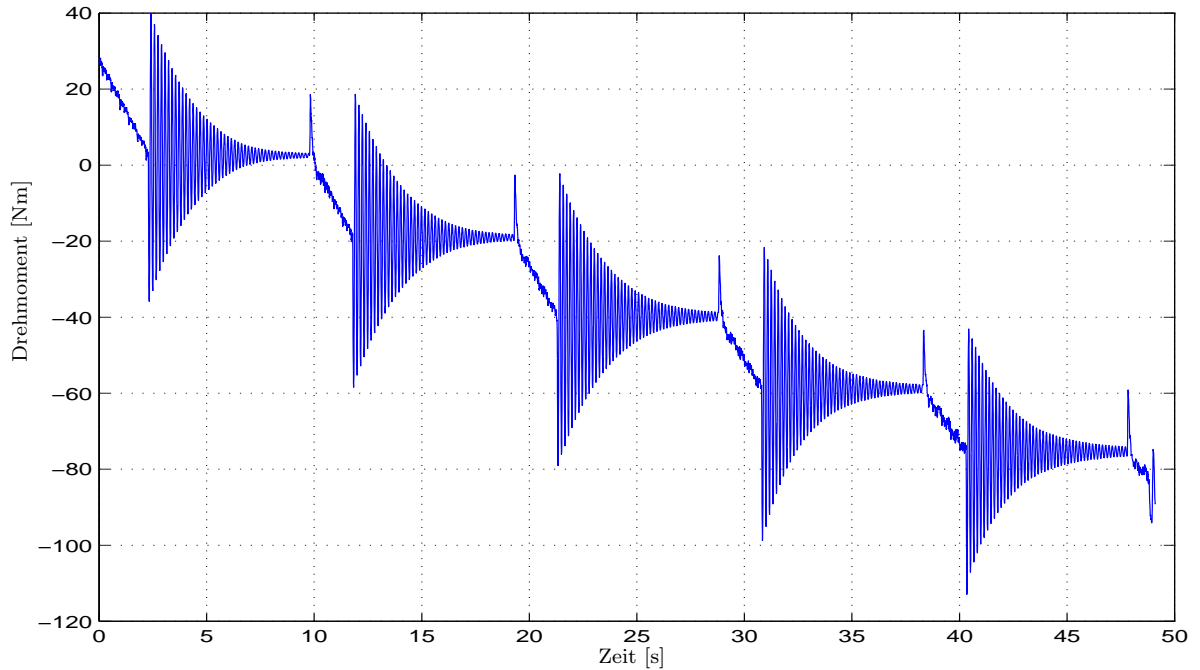


Abbildung 3.7.: Automatisierte Schwingungsmessung in verschiedenen Gelenkpositionen bei einem Gelenk des LBR [4]

In den Gleichungen (3.6) sind alle verwendeten Größen Skalare. Die Steifigkeit bzw. der Dämpfungskoeffizient des Gelenks 1 werden durch k und d repräsentiert. Die Massenparameter der bewegten Last sind m und s , für die Masse der Last und den Hebelarm zum Massenschwerpunkt. Durch die konstante Motorposition Θ_1 und die geringen Auslenkungen am Antrieb q_1 ist eine Linearisierung um die Ruhelage zulässig. Das Drehmoment kann durch eine exponentiell abklingende Funktion der Form

$$\tau_1(\delta, \omega) = \tau_0 + Ae^{-\delta t} \cos(\omega t + \Phi) \quad (3.7)$$

beschrieben werden. Durch die Identifizierung des Abklingkoeffizienten δ und der Frequenz ω lassen sich der Dämpfungskoeffizient und die Steifigkeit bestimmen. Dies erfolgt durch die Minimierung folgender Gleichung (3.8) mittels nichtlinearer Optimierung.

$$\min_{\delta, \omega} \sum_{j=1}^N ((\tau_1(\delta, \omega) - \tau_j)^2 \text{ mit } N = \text{Anzahl der Messpunkte} \quad (3.8)$$

Die Gelenkparameter eines Koppelgelenks (2/3, 4/5, 6/7) weisen starke Verkopplungen auf [21]. Die Steifigkeitsmatrix und Dämpfungsmatrix haben die Dimensionen $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ und $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$. Diese sind symmetrisch und positiv definit. Die Verkopplungen vermeiden, dass das oben beschriebene Verfahren zur Identifikation eines seriellen Gelenks zum Erfolg führen kann. Stattdessen werden die Gelenkparameter während einer Simulation nach Norm-2 Kriterien der Fehlerfunktion optimiert. Vor dem Optimierungsschritt müssen wiederum Messungen aufgenommen werden. Hierfür sind die Koppelgelenke 4/5 bzw. 6/7 auf zwei verschiedene Arten

in den Prüfstand einzuspannen. Bei der Schwingungsmessung um die Knickachse(Pitch) kann die Verkopplung aufgrund der geringen Trägheit der Drehachse(Roll) gering gehalten werden (Vgl. Abschnitt 3.1.1). So können gute Startwerte für die Steifigkeit dieser Achse erzielt werden. Nach der Schwingungsmessung bei Rotation um die Drehachse, werden beide Messungen für die Durchführung der Simulationsoptmierung genutzt. Für die Identifikation des Koppelgelenks 2/3 sind zwei verschiedene Einspannungen aufgrund der Pitch-Yaw-Konfiguration nicht gewinnbringend. Dennoch führen die Messungen der Schwingungen in der Optimierung zum Erfolg.

Für die Regelung des Roboters wird zur Zeit eine Steifigkeitsmatrix der Form,

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & k_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{32} & k_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{44} & k_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{54} & k_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{66} & k_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{76} & k_{77} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

genutzt. Hierbei wird die Verkopplung k_{67} des Gelenks 6/7 vernachlässigt ($k_{67} = k_{76} = 0$). Der Grund hierfür ist die schlechte Identifizierbarkeit dieses Parameters.

Kalibration der Drehmomentensensorik

Bei der Kalibration der Drehmomentensensoren wird das Offset des Drehmomentensensors im Modell nicht berücksichtigt und entsprechend nicht identifiziert. Der Grund hierfür ist die Veränderung des Offsets bei Durchführung der Montage des Roboters.

Die Drehmomente der Gelenke 1, 5 und 7 werden von je zwei Vollbrückenschaltungen gemessen, während die Drehmomente um die Gelenke 2 und 3 nur einmal gemessen werden. Die Messungen zur Kalibration erfolgen während der Rotation des jeweiligen Gelenks auf dem Identifikationsprüfstand. Hierbei werden die antriebsseitigen Gelenkwinkel Θ_i aufgezeichnet und auf den Abtrieb $q_{\Theta,i}$ umgerechnet, sowie die an den Vollbrücken anliegenden Spannungen. Aufgrund der einfachen Geometrie der Last, können Masse und Schwerpunkt als bekannt angenommen werden. Die anliegenden Kräfte ergeben sich aus der Multiplikation der Masse $m_{i,s}$ mit der Erdbeschleunigung, die aufgrund der Verwendung einer Wasserwaage bei dem Versuchsaufbau mit $9.81 \frac{m}{s^2}$ angenommen werden kann. Die Multiplikation der Kraft mit dem jeweiligen Hebelarm, der sinusförmig von der abtriebsseitigen Position $q_{\Theta,i}$ abhängt, ergibt das Moment. Die folgende Gleichung (3.10) beschreibt den mathematischen Zusammenhang.

$$\tau_{i,s}(q_i) = m_{i,s} \cdot g \cdot s_{i,s} \cdot \sin(q_i) \quad (3.10)$$

Abbildung 3.8 zeigt das Koppelgelenk 2/3 mit der Last im Gelenkidentifikationsprüfstand aus CAD-Daten.

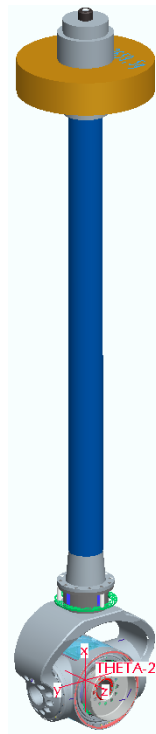


Abbildung 3.8.: Gelenk 2 mit Kalibrationslast

Durch die Lage der Drehmomentensensoren bzgl. der Gelenke 4 und 6 in Link 5 bzw. 7 ergeben sich die in Gleichung 3.3 angegebenen Abhängigkeiten von der Position des Gelenks 5 bzw. 7. Zur Vermeidung der schlechten Konditionierung des Minimierungsproblems werden für diese Sensoren zwei Messungen durchgeführt. Hierbei wird für die Gelenkpositionen 5 bzw. 7 eine Position von $+45^\circ$ bzw. -45° gewählt.

So ergibt sich für die Identifikation der Verstärkungsfaktoren der Drehmomentensensoren folgendes Minimierungsproblem:

$$\min_{k_{i,m}} \left(\sum_{j=1}^N (\tau_{i,s}(q_i) - k_{i,m} U_{i,m})^2 \right) \text{ mit } N = \text{Anzahl der Messungen} \quad (3.11)$$

Zur Kompensation der Sensor-Offsets der Drehmomentensensoren wird zur Zeit eine Methode im Betriebszustand des Roboters genutzt. Hierfür wird der Roboter vorzugsweise in die Nullkonfiguration $\mathbf{q}_\Theta = \mathbf{0}$ gefahren. In dieser Konfiguration sollten die Drehmomente, um die Gelenkachse $\boldsymbol{\tau} \approx \mathbf{0}$ betragen. Der Gemessene Wert wird dann als Sensoroffset angenommen und auf die tatsächlich gemessenen Werte addiert.

3.2. Krypton - Koordinatenmessmaschine

Als Referenzmesssystem steht für diese Arbeit ein Trackingsystem bzw. eine Koordinatenmessmaschine³ Krypton K600 zur Verfügung. Dieser Abschnitt stellt die Hardwarekomponenten und Softwareapplikationen vor.

3.2.1. Hardwarekomponenten

Das kamerabasierte Messsystem Krypton K600 kann zur 3D-Positions- bzw. 6D-Lagebestimmung von statischen oder dynamischen Objekten im Raum eingesetzt werden. Drei CCD-Kameras messen die eindimensionale Position eines aktiven Markers. Die Marker sind hier als infrarotlicht-emittierende LEDs ausgeführt. Die Linsensysteme der Kameras projizieren das eingehende Infrarotlicht auf die Bildebene der CCD-Sensoren. Diese Sensoren wandeln Lichtstärke in eine proportionale Spannung um. Daraus kann die eindimensionale Position eines Markers erfasst werden. Durch Triangulation von 3 Positionsmessungen eines Markers wird die dreidimensionale Position ermittelt. Die Verwendung von 3 Markern, die eine feste relative Position auf einem Target zueinander einnehmen, ermöglicht die Bestimmung der Lage(6D- Pose) eines Objekts im Arbeitsraum der Kamera. In der Bilderstrecke der Abbildung 3.9 sind die wichtigsten Komponenten des Systems dargestellt.



Abbildung 3.9.: Die wichtigsten Hardwarekomponenten des Krypton K600 Kamerasystems

Die Kontrolleinheit (3.9 (b)) synchronisiert die Abtastzeiten der Kamera mit den Emittierungszeiten der Marker. Der Steuerungs-PC dient als Anwenderschnittstelle mit verschiedenen Softwareapplikationen. Abbildung (3.9 (c)) zeigt die Space-Probe. Die Space-Probe ist ein Target zur statischen Messung von Positionen im Raum. Hierfür dienen neun Marker und ermöglichen eine Mess-Genauigkeit von etwa 0.06 mm (siehe Tabelle 3.5). Zur Messung dynamischer Positionen bzw. Posen dienen LEDs, die auf selbstkonstruierten Targets fix zueinander angeordnet werden. Die Targets werden mit Multiplexern bzw. Strober-Units mit der Kontrolleinheit verbunden. Durch die Verschaltung mehrerer Multiplexer kann die Anzahl

³Koordinatenmessmaschine ist eine Übersetzung des englischen Coordinate Measurement Machine und wird mit CMM abgekürzt.

an Markern erhöht werden. Dies kommt der Sichtbarkeit des Targets zugute. Der Abstrahlkonus der LED-Marker ist auf 100° ($\pm 50^\circ$ bzgl. der LED-Achse) limitiert. Die Genauigkeit des Messsystems ist in drei Zonen unterteilt, die in Abbildung 3.10 dargestellt sind. Tabelle 3.5 gibt die numerischen Werte für die Genauigkeiten an.

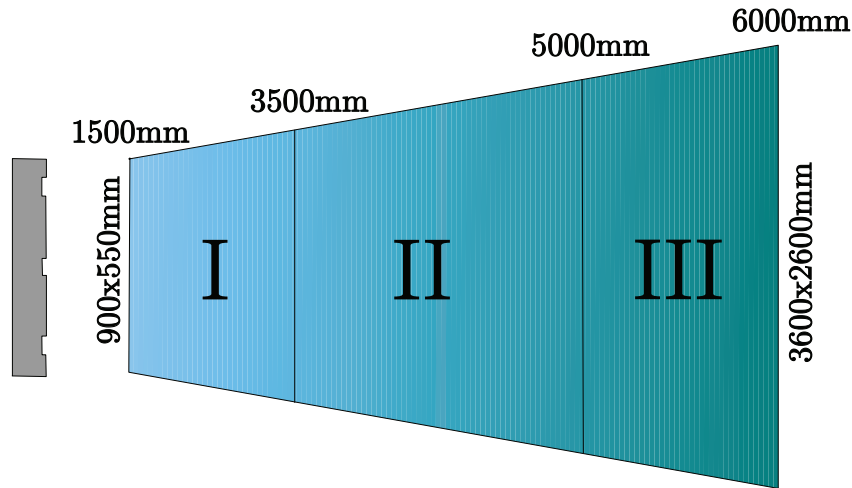


Abbildung 3.10.: Sichtfeld der Kamera K600 mit ihren 3 Genauigkeitszonen [23]

Tabelle 3.5.: Genauigkeitszonen des Messsystems Krypton K600 [23]

| Zone | volumetrische Genauigkeit ($\pm 2\sigma$) | Einzelpunkt-Genauigkeit ($\pm 2\sigma$) |
|------|---|---|
| I | $90\mu m + 10\mu m/m$ | $60\mu m + 7\mu m/m$ |
| II | $90\mu m + 25\mu m/m$ | $60\mu m + 17\mu m/m$ |
| III | $190\mu m + 25\mu m/m$ | $130\mu m + 17\mu m/m$ |

Bei den Angaben für die Genauigkeit ist zu beachten, dass die Genauigkeit in den 3 Genauigkeitszonen wiederum variiert. So ist zum Genauigkeitswert (1. Summand) ein weiterer Wert zu addieren. Dieser ergibt sich aus der Multiplikation des jeweiligen Abstands des Targets von dem Beginn der jeweiligen Zone mit dem zweiten Summanden, der in der Tabelle aufgeführt ist.

Zu den in Tabelle 3.5 angegebenen Genauigkeitsangaben muss zusätzlich noch das Rauschen betrachtet werden. Das Rauschen wird mit einem Wert von

$$\sigma = 10\mu m \quad (3.12)$$

angeben [24].

3.2.2. Softwareapplikationen

In diesem Abschnitt werden die in dieser Arbeit genutzten Softwarepakete des Messsystems, KCMM v6.2 und Roboscope v6.3 erläutert. Grundlegend für diese beiden Programme ist die Interface Software K-Link. K-Link ist für die Kommunikation der Hardwarekomponenten mit der Kontrolleinheit zuständig. K-Check dient dem Anwender zur Diagnose und grundlegenden Einstellung des Systems, wie der Emittierungsfrequenz der LEDs, der Marker-/LED-zahl etc.

KCMM bereitet die von der Space-Probe oder einem anderen Target empfangenen Daten für die weitere Verarbeitung vor [23]. Sie ermittelt aus den Daten die dreidimensionale Position des verwendeten Targets und stellt diese Informationen für CMM-Hostprogramme zur Verfügung. CMM-Hostprogramme dienen der weiteren Verarbeitung der Informationen auf verschiedene Art und Weisen. Der Datentransfer erfolgt entweder über eine serielle Schnittstelle oder über eine TCP/IP Verbindung. In dieser Arbeit wird KCMM zur Erfassung der Space-Probe Daten genutzt. Diese werden über eine serielle Schnittstelle mit einem Protokoll verschickt und an einem anderen Rechner mit Matlab-Simulink verarbeitet. Eine weitere Applikation von KCMM ist die Kalibration der Space-Probe, sowie der Kamera zur Genauigkeitssteigerung. Die Kalibrationen werden in [23] ausführlich erläutert.

Roboscope/ISO ist speziell für das Messen von dynamischen und statischen Robotereigenschaften, wie beispielsweise der Pose-Genauigkeit und Pose-Wiederholgenauigkeit ausgelegt [25]. In der Programmstruktur sind verschiedene Leistungstests hinterlegt, die in der DIN EN ISO 9283 als Leistungskenngrößen von Robotern definiert sind [1]. In dieser Arbeit werden ausschließlich benutzerdefinierte Tests durchgeführt, da die Auswertung der erfassten Daten mit Matlab-Simulink erfolgt. Die Daten werden nach der Aufzeichnung von Roboscope in einem Text-File abgespeichert. Diese werden daraufhin auf einem weiteren Rechner mit einer Matlab-Funktion ausgelesen und zu einem von Matlab unterstützten Format konvertiert.

3.3. Xsens - Inertial Measurement Unit

Zur Messung des Gravitationsvektors relativ zur Roboterbasis steht in dieser Arbeit die Trägheitsmesseinheit⁴ MTi der Firma Xsens zur Verfügung. Neben der IMU sind zusätzliche Sensoren, wie ein dreidimensionales Magnetometer und ein statischer Drucksensor integriert. Das sensoreigene Koordinatensystem ist bzgl. der Fläche und den Kanten der Grundplatte mit einer Genauigkeit von 0.1° kalibriert. Entsprechend ist auch die dynamische Genauigkeit dokumentiert. Abbildung 3.11 zeigt die IMU mit dem kalibriertem Koordinatensystem.

⁴Abk.: IMU (Inertial Measurement Unit)

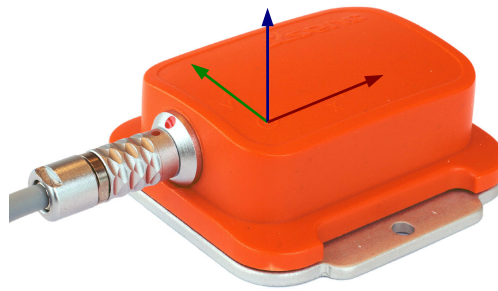


Abbildung 3.11.: IMU zur Messung des Gravitationsvektors bzgl. der Roboterbasis [29]

Die Abtastrate beträgt 120 Hz. Zur Einstellung der Ausgabeparameter dient der MT-Manager, eine Anwendersoftware für Windows. Standardmäßig werden der Beschleunigungsvektor und die Winkelgeschwindigkeit ausgegeben. In dieser Arbeit können die IMU-Daten direkt im Simulink-Modell durch eine S-function erhalten werden.

4. Modellierung des Kalibrationsprozesses

Eine vorhergehende Arbeit bzgl. der Kalibration der Roboterkinematik des medizinischen Leichtbauroboters MIRO hat gezeigt, dass der Einfluss der Durchbiegungen der Gelenke aufgrund der hohen Elastizitäten nicht zu vernachlässigen ist. Aufgrund der Abhängigkeit der Durchbiegung eines Gelenkes von dem anliegenden Drehmoment spielt bei der Kalibration der Roboterkinematik und der Elastizitäten die Drehmomentensensorik eine entscheidende Rolle. Die Drehmomentensensorik wird zur Zeit vor der Montage des Roboters durchgeführt, was zu Genauigkeitseinbußen bei der Detektion der Drehmomente führen kann. Somit ist eine iterative Vorgehensweise bei der Kalibration des Gesamtsystems erforderlich, in der sich schrittweise dem realen Robotermodell, sowie dem Sensormodell genähert wird.

In diesem Kapitel sollen die entwickelten Kalibrationsschritte vorgestellt werden. Zu Beginn erfolgt die Weiterentwicklung der statischen 6D-Kalibration, die in [19] für den MIRO entwickelt worden ist (Abschnitt 4.1). Hierbei wird vor allem der Einfluss der Elastizitäten des Systems charakterisiert und in die Kalibration implementiert. Der zweite Kalibrationsschritt, der dem Ansatz einer iterativen Roboterkalibration folgt, betrifft die Kalibration der Drehmomentensensorik des MIRO in zusammengebautem Zustand. Der hierfür entwickelte Ansatz wird im zweiten Teil dieses Kapitels vorgestellt. Aufgrund der Lage der Drehmomentensensoren ist es nötig, in einem dritten Schritt die Massenparameter des MIRO zu identifizieren. Dadurch sollen die gelenkseitigen Drehmomente näherungsweise mit Hilfe der gemessenen Drehmomente ermittelt werden können (Vgl. Abschnitt 3.1.2). Desweiteren werden in diesem Schritt die Offsets $\tau_{off,i}$ der Drehmomentensensoren identifiziert. Die Variation des bereits bestehenden Ansatzes für den LBR aus Abschnitt 3.1.4 wird in Abschnitt 4.3 vorgestellt. Diese passt die Identifikation der Massenparameter auf den MIRO an und bezieht die Offsets der Drehmomentensensorik ein.

Für jeden Kalibrationsschritt ist es zunächst nötig die möglichen Fehler ausreichend zu charakterisieren. Diese können dann in dem zu entwickelnden Verfahren berücksichtigt werden. Jedes Kalibrationsverfahren soll mit experimentellen Messungen auf den Roboter angewendet werden. Hierfür wird jeweils ein Verfahren vorgestellt, statische Posen zu generieren, die bei den Messungen vom Roboter einzunehmen sind. Die generierten Posen sollen der effizienten Anregung der jeweils zu identifizierenden Parameter dienen.

Jedes der hier vorgestellten Verfahren wurde vor der Anwendung auf dem Robotersystem simuliert. Die Ergebnisse der Simulationen sind im nachfolgenden Kapitel 5 dargestellt.

4.1. Erweiterung der statischen 6D-Kalibration um Gelenk- und Strukturelastizitäten

Die Kinematik des Roboters spielt nicht nur bzgl. der Pose-Genauigkeit eine entscheidende Rolle. Sie bildet ebenso die Grundlage für die Berechnung der dynamischen Zusammenhänge. Hierdurch wird die Genauigkeit der Berechnung der Drehmomente im Fall der inversen Dyna-

mik beeinflusst. Diese Drehmomente sind für die Umsetzung verschiedener Regelungsansätze, wie beispielsweise der Impedanzregelung oder der Drehmomentenregelung, nötig. Die Gelenk- und Strukturelastizitäten des MIRO haben einen großen Einfluss auf dessen Pose-Genauigkeit bzw. Genauigkeit des kinematischen Modells. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt ein Ansatz entwickelt, die verschiedenen Elastizitäten möglichst gewinnbringend in die kinematische Beschreibung des Roboters mit einzubeziehen.

Die Herkunft der Nachgiebigkeiten kann der Abbildung 4.1 entnommen werden. Hier wird ein Koppelgelenk schemenhaft dargestellt, wie es beim MIRO verwendet wird. Hauptsächlich stammen die Nachgiebigkeiten eines Antriebes aus dem „Flexible Spline“ des Harmonic-Drive Getriebes (F2a). Hierbei gilt es zusätzlich die Elastizität des Zahnriemens (F1a) zu beachten, mit denen sich eine Reihenschaltung der beiden Elastizitäten ergibt. Durch die gegenüberliegenden Antriebe und deren Verbindung durch das Kegelraddifferential ergibt sich die Ersatzelastizität am abtriebsseitigen Kegelrad durch die Parallelschaltung beider Antriebselastizitäten. Das Durchhängen eines Gelenks $\Delta\phi_i$ hervorgerufen durch die antriebsseitigen Elastizitäten ist abhängig von beiden abtriebsseitigen Drehmomenten τ_{roll} und τ_{pitch} . Der Grund hierfür ist, dass sich die Vorspannung der beiden parallelgeschalteten Elastizitäten mit den anliegenden Drehmomenten ändert. Hierdurch ergeben sich die bereits in Abschnitt 3.1.4 beschriebenen Koppelterme in der Steifigkeitsmatrix eines Koppelgelenks gemäß 3.9. Der im weiteren folgende Drehmomentsensor (F3) und das Strukturelement (F4), welches die Verbindung zum nächsten Koppelgelenk bzw. dem Endeffektor herstellt, bilden eine abtriebsseitige Reihenschaltung zweier Elastizitäten. Hierbei ist zu beachten, dass die Elastizität des Strukturelementes aufgrund der verwendeten Materialien deutlich geringer ist, als diejenige des Drehmomentsensors.

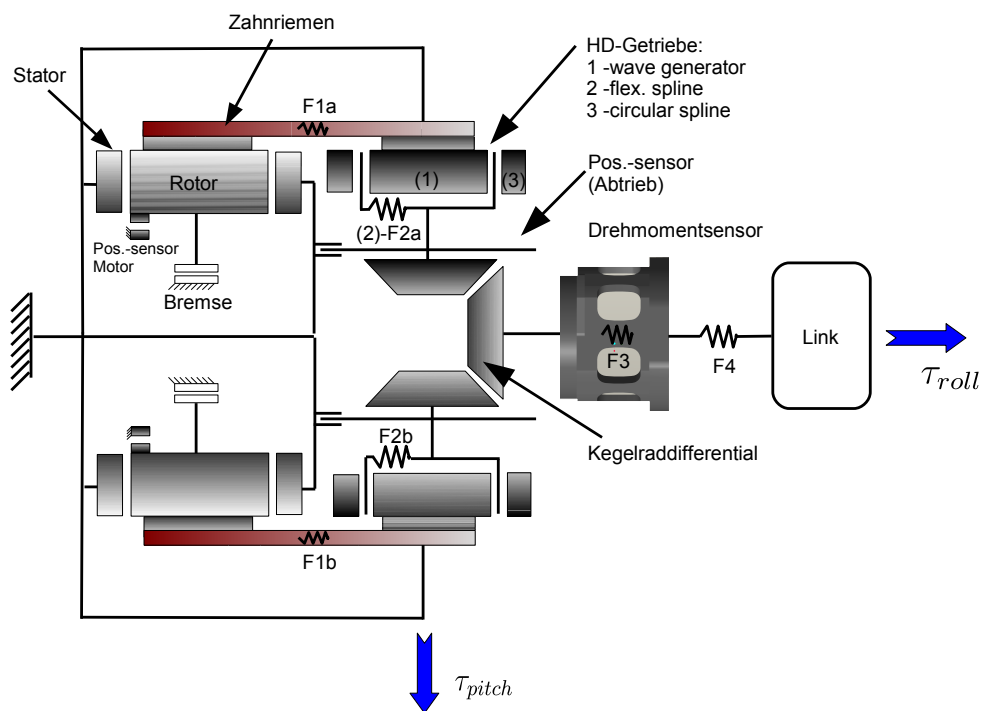


Abbildung 4.1.: Skizze eines Koppelgelenks mit eingezeichneten Elastizitäten

In den folgenden Abschnitten erfolgt zunächst die Modellierung der aus den Nachgiebigkeiten resultierenden Fehler in der kinematischen Kette (Abschnitt 4.1.1). Daraufhin wird ein entsprechender Ansatz für das erweiterte kinematische Modell vorgestellt (Abschnitt 4.1.2). Abschnitt 4.1.3 befasst sich mit der Steifigkeitsanalyse der Sensorkörper mittels der Methode der finiten Elemente. Schließlich wird eine Zielfunktion des Minimierungsproblems hergeleitet, die der Identifikation der an die Realität angenäherten kinematischen Parameter mittels nichtlinearer Optimierungsalgorithmen dient (Abschnitt 4.1.4).

4.1.1. Modellierung der Fehler im kinematischen Modell

Die Kinematik eines Roboters wird hauptsächlich über die Denavit-Hartenberg Parameter beschrieben. Diese werden den CAD-Daten des Roboters entnommen. Die Modellierung möglicher Abweichungen der konstruktiven DH-Parameter zu den realen Parametern wurde in Abschnitt 2.2 gezeigt.

Neben dem Einfluss dieser Abweichungen sind ebenso die Abweichungen der Steifigkeiten bzw. Elastizitäten der Gelenke mit in die Fehlerdarstellung einzubeziehen. Diese sind auf dem Gelenkidentifikationsprüfstand identifiziert worden (siehe Abschnitt 3.1.4). Durch die Abhängigkeiten der Durchbiegung eines seriellen Gelenks (Gelenk 1) von den anliegenden Drehmomenten, aufgrund der Elastizität, ergibt sich folgender Zusammenhang

$$\Delta q_i(\tau_i, \lambda_{k_{ii}}) = (k_{ii} + \lambda_{k_{ii}})^{-1} \cdot \tau_i \text{ mit } i = 1 \quad (4.1)$$

bzw.

$$\begin{bmatrix} \Delta q_i(\tau_i, \tau_j, \lambda_{k_{ii}}, \lambda_{k_{ij}}) \\ \Delta q_j(\tau_i, \tau_j, \lambda_{k_{ii}}, \lambda_{k_{ji}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (k_{ii} + \lambda_{k_{ii}}) & (k_{ij} + \lambda_{k_{ij}}) \\ (k_{ji} + \lambda_{k_{ji}}) & (k_{jj} + \lambda_{k_{jj}}) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tau_i \\ \tau_j \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

mit $i = 2, 4, 6$ und $j = i + 1$

für ein Koppelgelenk (Gelenke 2/3, 4/5, 6/7). Durch die Symmetrie der Steifigkeitsmatrix eines Koppelgelenks folgt, dass die Nebendiagonalelemente identisch sind ($(k_{ij} + \lambda_{k_{ij}}) = (k_{ji} + \lambda_{k_{ji}})$). Diese Abweichungen können durch eine Rotation um die z-Achse eines Koordinatensystems bzgl. der Gelenke in die kinematischen Zusammenhänge implementiert werden. Die resultierende Rotation ergibt sich ähnlich der Gleichung (2.20) für das serielle Gelenk 1 wie folgt.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{\Theta_i + q_i}(\Delta q_i(\tau_i, \lambda_{k_{ii}})) &:= \mathbf{R}(\Theta_i + q_i + \Delta q_i(\tau_i, \lambda_{k_{ii}})) \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\Theta_i + q_i + \Delta q_i(\tau_i, \lambda_{k_{ii}})) & -\sin(\Theta_i + q_i + \Delta q_i(\tau_i, \lambda_{k_{ii}})) & 0 \\ \sin(\Theta_i + q_i + \Delta q_i(\tau_i, \lambda_{k_{ii}})) & \cos(\Theta_i + q_i + \Delta q_i(\tau_i, \lambda_{k_{ii}})) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Durch die Drehmomentensensorik des MIRO und die Berechnung der inversen Roboterdynamik können die Drehmomente zur Kompensation der Gelenkelastizitäten näherungsweise ermittelt werden. Aufgrund der Anordnung der Vollbrückenschaltungen der Drehmomentensensoren bzgl. Achse 4 und 6 ist es möglich die Quermomente $\tau_{4,s,\perp}$ und $\tau_{6,s,\perp}$ zu messen. Diese

können verwendet werden um die Steifigkeiten der Drehmomentensensoren um die entsprechenden Achsen $4, \perp$ und $6, \perp$ in das elastische kinematische Robotermodell mit einzubeziehen (vgl. Abschnitt 3.1.2). Eine Gelenkelastizität ist hier nicht zu erwarten aufgrund der Lagerung des Gelenks orthogonal zu den oben genannten Achsen. Die formelle Darstellung der hieraus resultierenden Abweichung der Lage des darauffolgenden Koordinatensystems 5 bzw. 7 erfolgt mittels einer Rotation um die x-Achse des jeweiligen Koordinatensystems des Gelenks 4 bzw. 6.

$$\mathbf{R}_{x_i}(\Delta\alpha_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Delta\alpha_i) & -\sin(\Delta\alpha_i) \\ 0 & \sin(\Delta\alpha_i) & \cos(\Delta\alpha_i) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\text{mit } \Delta\alpha_i = f(\tau_{i,\perp}, k_{i,\perp}, \lambda_{k_{i,\perp}}) \quad (4.5)$$

und $i = 4, 6$

Die Steifigkeiten der Drehmomentensensoren bzgl. Achse 4 und 6 wurden bisher nicht identifiziert. Hierfür wird in Abschnitt 4.1.3 ein Verfahren basierend auf der Methode der Finiten Elemente vorgestellt. So ergibt sich $\Delta\alpha_i$ zu

$$\Delta\alpha_i = (k_{i,\perp} + \lambda_{k_{i,\perp}})^{-1} \cdot \tau_{i,\perp} \text{ mit } i = 4, 6 . \quad (4.6)$$

4.1.2. Herleitung einer angepassten direkten Kinematik

Die direkte Kinematik ist abhängig von der abtriebsseitigen Position der Gelenke \mathbf{q} . Beim MIRO wird die antriebsseitige Position Θ_i des Gelenks mit den Untersetzungsverhältnissen der Harmonic-Drive Getriebe auf die abtriebsseitige Position $\mathbf{q}_{\Theta,i}$ umgerechnet. Bei den Koppelgelenken ist zusätzlich das Untersetzungsverhältnis des Kegelraddifferentialgetriebes mit einzubeziehen. Die Gelenkelastizitäten führen zu einer Durchbiegung der Gelenke $\Delta\mathbf{q}$. Diese werden bisher nicht in der direkten Kinematik berücksichtigt. Zur Beschreibung der elastischen Roboterkinematik ist dies jedoch nötig und wird wie folgt durchgeführt.

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}_{\Theta} + \Delta\mathbf{q} \quad (4.7)$$

$$\text{mit } \mathbf{q}_{\Theta} = \mathbf{Q} \cdot \Theta \quad (4.8)$$

$$\text{und } \Delta\mathbf{q} = \mathbf{K}^{-1} \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (4.9)$$

Die Steifigkeitsmatrix \mathbf{K} ist analog zu derjenigen, die in Abschnitt 3.1.4 hergeleitet wird (siehe Gleichung (3.9)). Allerdings wird hier die Verkopplung der Elastizitäten von Koppelgelenk 6/7 mit einbezogen. Die Positionsübertragungsmatrix wird mit \mathbf{Q} bezeichnet (siehe Anhang A.2). Die Durchbiegungen aufgrund Elastizitäten der Drehmomentensensoren bzgl. der x-Achse der

Koordinatensysteme der Gelenke 4 und 6 können durch Transformationsmatrizen der Form

$$\mathbf{T}_{x_i}(\Delta\alpha_i) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{x_i}(\Delta\alpha_i) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{für } i \in [1, 2, \dots, n] \quad (4.10)$$

$$\text{mit } \Delta\alpha_i \begin{cases} = k_{i,\perp}^{-1} \cdot \tau_{i,\perp} & \text{für } i \in [4, 6] \\ = 0 & \text{für } i \notin [4, 6] \end{cases} \quad (4.11)$$

beschrieben werden. Die direkte Kinematik unter Einfluss der Gelenk- und Sensorkörperelastizitäten ergibt sich somit mit dem \mathbf{q} aus Gleichung (4.7) zu

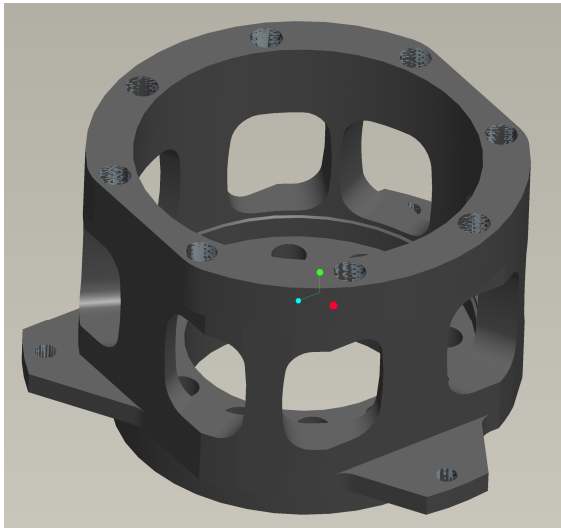
$$\mathbf{T}_{TCP}^{Base}(\mathbf{q}, \Delta\alpha_i) = \prod_{i=1}^n \mathbf{T}_i^{i-1}(q_i, \Delta\alpha_i), \quad (4.12)$$

$$\text{wobei } \mathbf{T}_i^{i-1}(q_i, \Delta\alpha_i) = \mathbf{T}_i^{i-1}(q_i) \cdot \mathbf{T}_{x_i}(\Delta\alpha_i) \quad (4.13)$$

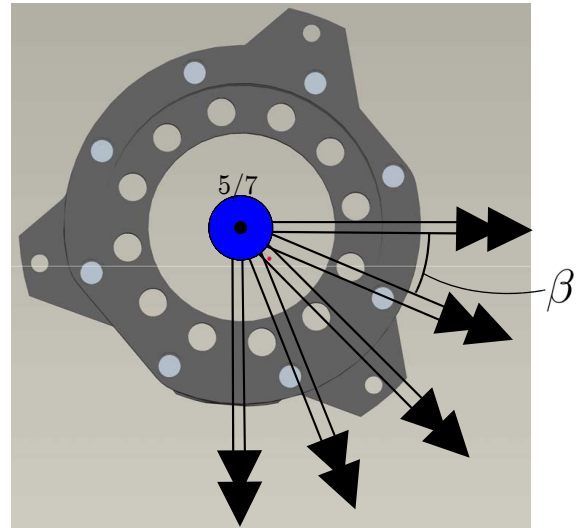
Hierbei entspricht $i = 0$ der Roboterbasis und $i = n$ dem TCP des Roboters, wobei n der Anzahl der Freiheitsgrade entspricht.

4.1.3. Steifigkeitsanalyse der Sensorkörper

Aufgrund der Komplexität der Geometrie der Sensorkörper wird zur Identifikation der Steifigkeit bzgl. der Messung der Drehmomente um die 4, \perp - bzw. 6, \perp -Achse die Methode der Finiten Elemente genutzt (siehe Abbildung 4.2a). Zur Simulation der Belastungen auf die einzelnen Sensorkörper wird das FE-Programmsystem Abaqus/CAE verwendet.



(a) Drehmomentsensor des Koppelgelenks 4/5



(b) Drehmomentachsen zur FE-Analyse

Abbildung 4.2.: Drehmomentsensor des Koppelgelenks 4/5 und Belastungsachsen zur FE-Analyse

Ein FE-Programmsystem, wie auch Abaqus/CAE, besteht grundsätzlich aus drei Teilen, dem Preprozessor, dem FE-Solver und dem Postprozessor. Im Preprozessor wird das jeweilige Problem modelliert bzw. konstruiert. Desweiteren werden Materialverhalten, Randbedingungen, Kontaktbedingungen, sowie Belastungen formuliert und das Modell mit finiten Elementen vernetzt. Der Solver löst daraufhin die Differentialgleichungen, die das Modell beschreiben, mit numerischen Näherungsverfahren und übermittelt die Lösung dem Postprozessor. Dieser dient dem Anwender eines FEM-Tools zur Auswertung der Simulation.

Die Sensorkörper wurden als Iges-Dateien in den Preprozessor importiert. Das Material der Sensorkörper ist monolithisches Aluminium. Dessen Materialverhalten kann als isotrop-elastisch angenommen werden. Ein isotropes Material ist dadurch charakterisiert, dass es in alle Raumrichtungen die gleichen Materialeigenschaften aufweist. Entsprechend dem monolithischen Aluminium wurde der Elastizitätsmodul mit $E_{Al} = 70000 \text{ MPa}$ gewählt. Die Querkontraktionszahl beträgt $\nu_{Al} = 0.34$. Zur Simulation des anliegenden Roboterglieds wurde eine Hohlwelle an dem distalen Ende des Sensorkörpers extruiert. Am oberen Ende ist die Hohlwelle geschlossen.

Durch eine Partitionierung kann der Hohlwelle ein anderes Material zugewiesen werden. Hier wurde ein fiktives Material mit einem Elastizitätsmodul von $E = 30 \cdot 10^{10} \text{ MPa}$ und einer Querkontraktionszahl von $\nu = 0.3$ definiert. Der hohe Elastizitätsmodul ermöglicht es nur die Durchbiegung des Sensorkörpers zu analysieren. Die Durchbiegung resultiert aus einer Kraft auf das distale Ende der Hohlwelle. Dies entspricht der Aufbringung eines Momentes um die Achsen der Sensorkörper bzgl. der Roboterachsen 4 und 6.

Als Randbedingung wird eine feste Einspannung des Sensorkörpers an dessen Flanschfläche gewählt. Die Kraft, die im Zentrum des distalen Endes der Hohlwelle angreift, wird entsprechend dem Hebelarm und der jeweiligen Belastungsgrenzen gewählt, die in Tabelle 3.3 angegeben werden. Das Modell wird mit Tetraederelementen des Typs C3D4 vernetzt.

Nach der Simulation des Modells im FE-Solver, kann die Verschiebung des Knotens, an dem die Kraft angreift, im Postprozessor ausgegeben werden. Hierdurch und durch die Kenntnis der Länge des Hebelarmes vom Ursprung des Koordinatensystems im Sensorkörper bis zum Kraftangriffspunkt kann der Biegewinkel $\Delta\alpha_{i,\perp}$ über trigonometrische Zusammenhänge berechnet werden. Durch die Kenntnis des anliegenden Drehmomentes $\tau_{i,\perp}$ kann über den Zusammenhang

$$k_{i,\perp} = \frac{\tau_{i,\perp}}{\Delta\alpha_{i,\perp}} \quad (4.14)$$

die Steifigkeit $k_{i,\perp}$ des Sensorkörpers ermittelt werden. Da die Sensorkörper nicht rotations-symmetrisch sind und durch die Lage im Roboterglied 5 bzw. 7 bzgl. der Achsen 4, \perp und 6, \perp nicht konstant ist, sollte die Elastizität um verschiedene Achsen ermittelt werden. Abbildung 4.2b zeigt die gewählten Achsen, wobei hier $\beta = 22.5^\circ$ gewählt wird. Durch die Bildung des Mittelwertes der 5 ermittelten Steifigkeiten $k_{i,\perp}$ sollte eine gute Näherung an die Steifigkeit erreicht werden, die diejenige des Sensorkörpers beschreibt. In Abbildung 4.3 sind die auftretenden Dehnungen in einem Kontourplot dargestellt. Hierbei wurde eine Skalierung der Deformationen mit einem Faktor 100 gewählt.

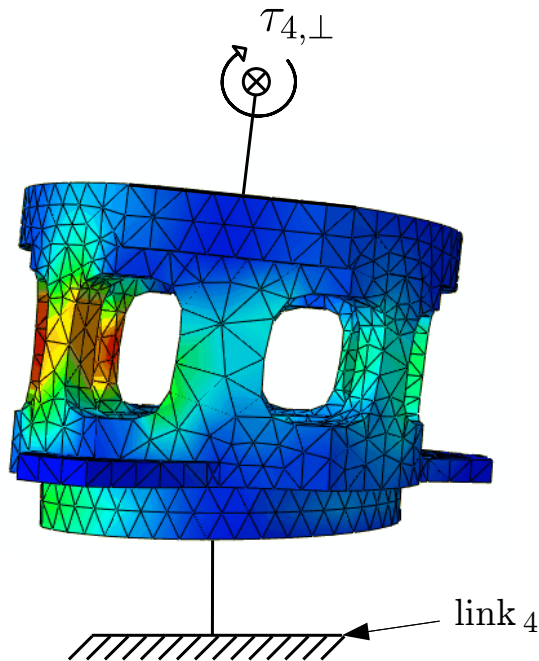


Abbildung 4.3.: FE-Analyse der Elastizität des Sensorkörpers des Koppelgelenks 4/5

Die Steifigkeiten der beiden Sensorkörper sind Tabelle 4.1 zu entnehmen.

Tabelle 4.1.: Steifigkeiten der Sensorkörper 4/5 und 6/7 in verschiedenen Richtungen und deren Mittelwert \bar{k}

| | $k_{4,i}$ in $\left[\frac{Nm}{rad}\right]$ | $k_{6,i}$ in $\left[\frac{Nm}{rad}\right]$ |
|------------|--|--|
| k_0 | 37942.42 | 22845.94 |
| $k_{22.5}$ | 38072.11 | 22820.50 |
| k_{45} | 38460.14 | 22731.37 |
| $k_{67.5}$ | 38886.04 | 22627.31 |
| k_{90} | 39092.99 | 22568.78 |
| \bar{k} | 38490.74 | 22718.78 |

Die Werte für die Steifigkeiten um die verschiedenen Achsen zeigen nur leichte Abweichungen von maximal 3%. Diese resultieren in einer maximalen translatorischen Abweichung am TCP im hundertstel Millimeterbereich. Aus diesem Grund ist die Mittelwertbildung zum Erhalt eines Startwertes für die Sensorsteifigkeiten zulässig.

4.1.4. Herleitung einer Zielfunktion für die Minimierung des Pose-Fehlers mittels nichtlinearer Optimierungsmethoden

Die Zielfunktion, die zur Minimierung des Pose-Fehlers dient, entspricht im wesentlichen derjenigen aus [19]. Zwecks der Vollständigkeit dieser Arbeit wird die Zielfunktion in diesem Abschnitt erneut hergeleitet. Daraufhin wird die Methode vorgestellt, die zur Untersuchung hinsichtlich der identifizierbaren Parameter und Konditionierung des Optimierungsproblems dient.

Die allgemeine Formulierung des Optimierungsproblems lautet wie folgt.

$$\min_{\mathbf{p}_{Kin}} f(\mathbf{p}_{Kin}) \quad (4.15)$$

Die zu identifizierenden Parameter \mathbf{p}_{Kin} setzen sich aus 24 DH-Parametern, 12 Parametern für die konstanten Transformationen, 10 Gelenksteifigkeiten und 2 Steifigkeiten der Sensorkörper der Drehmomentensensoren von Koppelgelenk 4/5 und 6/7 zusammen. Die 48 Parameter werden hinsichtlich ihrer Identifizierbarkeit in Kapitel 5.2 überprüft.

Für die Kalibration der Roboterkinematik des MIRO stehen die Messungen des Referenzmesssystems der einzelnen Posen in Form von $\mathbf{T}_{Target,cam,j}^{Ref}$ zur Verfügung. Desweiteren werden die Daten der Inline-Sensorik mit Θ_j und τ_j benötigt. Die antriebsseitige Position Θ_j wird nach Gleichung (4.7) auf die abtriebsseitige Position $\mathbf{q}_{\Theta,j}$ umgerechnet. Diese und die direkte Kinematik ermöglichen die Berechnung der Posen des TCPs in der Form $\mathbf{T}_{TCP}^{Base}(\mathbf{q}_{\Theta,j}, \tau_j)$. Dazu dient die in Abschnitt 4.1.2 hergeleitete direkte Kinematik. Hierbei ist $j = 1, \dots, J$, wobei J der Anzahl der gemessenen Posen entspricht. Zur Vergleichbarkeit der beiden Posen $\mathbf{T}_{Target,cam,j}^{Ref}$ und $\mathbf{T}_{TCP}^{Base}(\mathbf{q}_{\Theta,j})$ müssen diese mittels der konstanten Transformationen $\mathbf{T}_{Target}^{TCP}$ und \mathbf{T}_{Base}^{Ref} nach folgender Vorschrift umgerechnet werden.

$$\mathbf{T}_{Target}^{Base}(\mathbf{q}_{\Theta,j}, \tau_j) = \mathbf{T}_{TCP}^{Base}(\mathbf{q}_{\Theta,j}, \tau_j) \cdot \mathbf{T}_{Target}^{TCP} \quad (4.16)$$

$$\mathbf{T}_{Target,cam,j}^{Base} = (\mathbf{T}_{Base}^{Ref})^{-1} \cdot \mathbf{T}_{Target,cam,j}^{Ref} \quad (4.17)$$

Der translatorische Fehler, der aus dem fehlerbehafteten kinematischen Modell resultiert, ergibt sich zu:

$$F_{Translation,j} = \sqrt{(t_x(\mathbf{q}_{\Theta,j}, \tau_j) - t_{x,cam,j})^2 + (t_y(\mathbf{q}_{\Theta,j}, \tau_j) - t_{y,cam,j})^2 + (t_z(\mathbf{q}_{\Theta,j}, \tau_j) - t_{z,cam,j})^2}. \quad (4.18)$$

Der rotatorische Fehler wird mittels der Achse-Winkel-Beziehung zweier Rotationsmatrizen formuliert. Durch die Multiplikation des Winkels mit der Translation von dem Endeffektor-Target zum TCP des Roboters $|t_{TCP}^{Target}|$, kann der rotatorische Fehler als metrisches Maß in die Zielfunktion implementiert werden.

$$R_{diff,j} = R_{Target}^{Base}(\mathbf{q}_{\Theta,j}) \cdot (R_{Target,cam,j}^{Base})^{-1} \quad (4.19)$$

$$\Theta = \arccos \frac{spur(R_{diff,j}) - 1}{2} \quad (4.20)$$

$$F_{Orientierung,j} = \Theta \cdot |t_{TCP}^{Target}| \quad (4.21)$$

Die Zielfunktion ergibt sich aus der Summe des translatorischen und rotatorischen Fehlers, wie folgt:

$$\min_{\mathbf{p}_{Kin}} \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=1}^k \sqrt{(F_{Translation,j} + F_{Orientierung,j})^2} . \quad (4.22)$$

Zur Untersuchung des oben beschriebenen Minimierungsproblems (vgl. Gleichung 4.15) hinsichtlich der identifizierbaren Parameter, sowie der Konditionierung des Problems, können zwei Ansätze verfolgt werden.

Beobachtungsmatrix nach Khalil

Eine differentielle Abweichung eines Parameters der kinematischen Beschreibung des Roboters kann zu einer differentiellen Abweichung der Pose des Endeffektors des Roboters führen.

$$\delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \delta \mathbf{t} \\ \delta \mathbf{r} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{gen} \delta \mathbf{p}_{Kin} \quad (4.23)$$

Hier beschreibt $\delta \mathbf{x}$ die differentielle Abweichung der Endeffektorpose mit einem Vektor der Dimension $\delta \mathbf{x} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$. Die differentielle translatorische Abweichung und rotatorische Abweichung der Dimension $\mathbb{R}^{3 \times 1}$ werden mit \mathbf{t} und \mathbf{r} bezeichnet. Die generalisierte Jacobimatrix \mathbf{J}_{gen} berechnet sich ähnlich der geometrischen Jacobi-Matrix aus [15] und hat die Dimension $\mathbf{J}_{gen} \in \mathbb{R}^{6 \times p}$. Hierbei entspricht p der Anzahl der kinematischen Parameter \mathbf{p}_{Kin} .

Jeder Abweichung eines rotatorischen kinematischen Parameters, wie α_{i-1} , Θ_i oder $\Delta \mathbf{q}_i(k_{ii})$, folgt eine translatorische Abweichung am Endeffektor des Roboters. Hinzu kommt eine rotatorische Abweichung des jeweiligen Koordinatensystems bzgl. des i -ten Gelenks.

$$\mathbf{j}_{gen} r_i = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{r_i} \times \mathbf{t}_{n+1}^i \\ \mathbf{e}_{r_i} \end{bmatrix} . \quad (4.24)$$

Hierbei beschreibt \mathbf{e}_{r_i} den Einheitsvektor des rotatorischen Anteils eines Koordinatensystems bzgl. eines Gelenks i , der von dem jeweiligen rotatorischen Parameter beschrieben wird. Die Translation \mathbf{t}_{n+1}^i vom Ursprung des Koordinatensystems des Gelenks i zum abschließendem Koordinatensystem der kinematischen Kette wird wie folgt berechnet:

$$\mathbf{t}_{n+1}^i = \mathbf{t}_{n+1}^{Base} - \mathbf{t}_i^{Base} . \quad (4.25)$$

Das Koordinatensystem $n + 1$ ist in dem Fall der statischen 6D-Kalibration gleich dem Koordinatensystem des Endeffektortargets.

Die Abweichung, der Pose des Endeffektortargets, hervorgerufen durch einen translatorischen Parameter t_i ergibt sich wie folgt.

$$\mathbf{j}_{gen} t_i = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{z_i} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} . \quad (4.26)$$

Hierbei ist \mathbf{e}_{z_i} immer der Einheitsvektor in Richtung der z_i -Achse des Koordinatensystems des Gelenks i .

Je Konfiguration \mathbf{q}_m ergibt sich die Jacobi-Matrix \mathbf{J}_{gen} zu:

$$\mathbf{J}_{gen} = [\dot{\mathbf{j}}_{gen}^{r_i} \quad \dot{\mathbf{j}}_{gen}^{t_i} \quad \dots \quad \dot{\mathbf{j}}_{gen}^{r_{n+1}} \quad \dot{\mathbf{j}}_{gen}^{t_{n+1}}] \quad \text{mit } i = 1, \dots, p \quad (4.27)$$

Die Beobachtungsmatrix \mathbf{W} , die zur Untersuchung des Optimierungsproblems verwendet wird, setzt sich dann zeilenweise aus den generalisierten Jacobi-Matrizen $\mathbf{J}_{gen,j}$ zusammen. Gleichung (4.28) verdeutlicht diesen Zusammenhang.

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{gen,j} \\ \vdots \\ \mathbf{J}_{gen,J} \end{bmatrix} \quad \text{mit } j = 1, \dots, J \quad (4.28)$$

Hierbei entspricht der Index J der Anzahl an gemessenen Posen.

Die identifizierbaren Parameter lassen sich nun, wie bereits in Abschnitt 2.4 beschrieben über die Hauptdiagonalelemente der Matrix \mathbf{R} nach der QR-Zerlegung der Beobachtungsmatrix \mathbf{W} bestimmen. Die Konditionierung des Optimierungsproblems ergibt sich analog zu Gleichung (2.59).

Jacobi-Matrix mittels numerischem Differenzenquotienten

Durch eine andere Formulierung der oben hergeleiteten Zielfunktion kann die Jacobi-Matrix bzw. Beobachtungsmatrix auf eine andere Art und Weise berechnet werden. Hierbei werden die einzelnen Fehler in 6 Dimensionen einer Messung nicht zu einem Skalar zusammengefasst, sondern in einen Spaltenvektor $\mathbf{f}_{jac,j}$ geschrieben. Für jede weitere Messung wird der Vektor um weitere 6 Zeilen erweitert. So ergibt sich ein Spaltenvektor der Dimension $\mathbf{f}_{jac} \in \mathbb{R}^{6J \times 1}$. Diese Zusammenhänge sind Gleichung 4.29 zu entnehmen.

$$\mathbf{f}_{jac} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{jac,j} \\ \vdots \\ \mathbf{f}_{jac,J} \end{bmatrix} \quad \text{mit } \mathbf{f}_{jac,j} = \begin{bmatrix} f_{t_x,j} \\ f_{t_y,j} \\ f_{t_z,j} \\ f_{r_x,j} \\ f_{r_y,j} \\ f_{r_z,j} \end{bmatrix} \cong \delta \mathbf{x} \quad (4.29)$$

Die Berechnung der Jacobi-Matrix erfolgt mithilfe der partiellen Ableitungen von \mathbf{f}_{jac} nach den einzelnen kinematischen Parametern \mathbf{p}_{Kin} .

$$\mathbf{W} = \mathbf{J}_{num} = \frac{\partial \mathbf{f}_{jac}}{\partial \mathbf{p}_{Kin}} \quad (4.30)$$

Hier entspricht \mathbf{J}_{num} der Beobachtungsmatrix \mathbf{W} .

Die identifizierbaren Parameter und die Kondition des Optimierungsproblems ergeben sich wiederum nach dem Verfahren in Abschnitt 2.4 mittels QR-Zerlegung und Singulärwertzerlegung der Jacobi-Matrix \mathbf{J}_{num} .

4.2. Kalibration der roboterinternen Momentensensorik

Die Drehmomentensensorik des MIRO wird bereits vor der Montage des Roboters auf einem Gelenkidentifikationsprüfstand kalibriert (vgl. 3.1.4). Dennoch entstehen im Betriebszustand des Roboters Effekte, die auf Abweichungen der real anliegenden Drehmomente an den Gelenken zu den gemessenen zurückzuführen sind. Ein Beispiel für solche Effekte ist das Driften des Roboters unter Nutzung der Drehmomentenregelung. Desweiteren fällt bei der Regelung des Roboters mit einem Impedanzregler auf, dass bei dem Versuch, ein Gelenk manuell zu rotieren starke Reaktionskräfte auftreten. Bei ersten Experimenten hinsichtlich der Kalibration der Roboterkinematik gibt es bleibende Modellfehler von etwa 0.7 mm bzgl. der mittleren Posegenauigkeit. Durch den starken Einfluss der Gelenk- und Strukturelastizitäten kann diese Abweichung zu gewissem Anteil auf eine fehlerhafte Messung der Drehmomente zurückgeführt werden. Zudem ist bei dem Vergleich der gemessenen Drehmomente und der über den angepassten rekursiven Newton-Algorithmus berechneten Drehmomente eine Abweichung festzustellen.

Nach abgeschlossener Kalibration der Roboterkinematik ist es möglich die Drehmomente im statischen Lastfall mit erhöhter Genauigkeit zu berechnen. Den Einfluss der fehlerbehafteten Massenparameter gilt es bei der Kalibration der Drehmomentensensorik zu eliminieren.

Der hier entwickelte Ansatz nutzt die Verwendung verschiedener Massen am Endeffektor bei der Anfahrt und Messwertaufnahme an der gleichen abtriebsseitigen Gelenkconfiguration \mathbf{q} . Durch die Bildung der Differenz der zwei gemessenen Drehmomentenvektoren und den beiden berechneten Drehmomenten kürzen sich die Massenparameter aus den Gleichungssystemen heraus. Somit entfällt die Abhängigkeit von der genauen Kenntnis der Massenparameter. Die folgenden Gleichungen sollen diese Zusammenhänge mathematisch erläutern.

Die Drehmomentenvektoren $\boldsymbol{\tau}_1$ und $\boldsymbol{\tau}_2$ bei Verwendung von 2 verschiedenen Lasten $l1$ und $l2$ am Endeffektor, sowie der Anfahrt der gleichen abtriebsseitigen Pose in Gelenkkoordinaten berechnen sich wie folgt:

$$\boldsymbol{\tau}_1 = \boldsymbol{\tau}_{robot} + \boldsymbol{\tau}_{l1} \quad (4.31)$$

$$\boldsymbol{\tau}_2 = \boldsymbol{\tau}_{robot} + \boldsymbol{\tau}_{l2} \quad (4.32)$$

Hier wird mit $\boldsymbol{\tau}_{robot}$ der Drehmomentenvektor gekennzeichnet, der aus den Massen der Roboterstruktur resultiert. Die Drehmomentenvektoren $\boldsymbol{\tau}_{l1}$ und $\boldsymbol{\tau}_{l2}$ haben ihren Ursprung in der jeweiligen Belastung des Endeffektors und werden ausschließlich über die Kinematik berechnet. Die Differenz von $\boldsymbol{\tau}_1$ und $\boldsymbol{\tau}_2$ ergibt sich gemäß Gleichung (4.34).

$$\Delta\boldsymbol{\tau} = (\boldsymbol{\tau}_{robot} + \boldsymbol{\tau}_{l1}) - (\boldsymbol{\tau}_{robot} + \boldsymbol{\tau}_{l2}) \quad (4.33)$$

$$\Delta\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{l1} - \boldsymbol{\tau}_{l2} \quad (4.34)$$

Entsprechend der in einem späteren Abschnitt 4.2.1 modellierten Fehler im Sensormodell ist im Kalibrationsschritt der Parametervektor \mathbf{p}_τ zu identifizieren. Aus den enthaltenen Abweichungen der Parameter von den realen Werten ergibt sich ein Fehler $\epsilon_{\Delta\tau,j}(\mathbf{q}_j, \mathbf{p}_\tau)$ gemäß Gleichung (4.35). Die Formulierung des allgemeinen nichtlinearen Optimierungsproblems kann

durch Gleichung (4.36) beschrieben werden.

$$\epsilon_{\Delta\tau,j}(\mathbf{q}_j, \mathbf{p}_\tau) = \Delta\boldsymbol{\tau}_{sensor}(\mathbf{q}_j, \mathbf{p}_\tau) - \Delta\boldsymbol{\tau}_{model}(\mathbf{q}_j) \quad (4.35)$$

$$\min_{\mathbf{p}_\tau} \sum_{j=1}^k (\epsilon_{\Delta\tau,j}(\mathbf{q}_j, \mathbf{p}_\tau))^2 \quad \text{mit } k = \text{Anzahl der Kalibrationsposen} \quad (4.36)$$

In den folgenden Abschnitten werden die nötigen Schritte zur Umsetzung dieses Ansatzes zur Kalibration der Drehmomentensensorik aufgeführt. Zunächst werden die Fehler modelliert, die im Sensormodell enthalten sind (Abschnitt 4.2.1). Ein Verfahren zur Linearisierung des Optimierungsproblems nach Gleichung (4.36) dient der Determinierung des globalen Minimums des Optimierungsproblems (Abschnitt 4.2.2). Bei der Lösung von Minimierungsproblemen mittels nichtlinearer Optimierung kann bei Vorgabe von schlechten Startwerten lediglich in einem lokales Minimum resultieren. Daraufhin wird ein Ansatz zur optimierten Wahl der Kalibrationsposen vorgestellt und umgesetzt. Der Ansatz soll die Konditionierung des Optimierungsproblems verbessern. Desweiteren wird eine Methode vorgestellt, den starken Einfluss der Gelenkelastizitäten zu kompensieren. Hierdurch soll gewährleistet werden, dass die gleiche kartesische Pose mit unterschiedlichen Belastungen des Endeffektors erreicht werden kann (Abschnitt 4.2.3). Zusätzlich wird ein Vorschlag zur Kompensation eines möglichen Temperaturdrifts des Sensors gegeben (Abschnitt 4.2.4). Die Ergebnisse der Simulationen bzgl. des hier vorgestellten Verfahrens werden in Kapitel 5.3 geliefert.

4.2.1. Modellierung der Fehler im Modell der Drehmomentensensoren

Zur Umrechnung der an den Vollbrücken der Sensorkörper anliegenden Spannung in ein Drehmoment dient ein Verstärkungsfaktor sowie ein Sensoroffset. Durch die oben beschriebenen Effekte, die im Betriebszustand des Roboters auftreten, kann angenommen werden, dass es Abweichungen der Verstärkungsfaktoren zum realen Verstärkungsfaktor gibt. Desweiteren wird das Sensoroffset durch die Anfahrt der Null-Konfiguration identifiziert und angenommen, dass hier die Drehmomente an den einzelnen Gelenken gleich null sind (vgl. Abschnitt 3.1.4). Die Kinematik, die in der Robotersteuerung verwendet wird, ist fehlerbehaftet. Zudem sind auch die Massenparameter lediglich aus der Konstruktion bekannt. Aus diesen Gründen kann nicht davon ausgegangen werden, dass die bisher genutzte Methode zu einer genauen Lösung der Identifikation der Sensoroffsets führen. Die darauffolgende Gleichung unter Einbezug der Abweichungen der Sensorverstärkung $\lambda_{k_{i,m}}$ und des Sensoroffsets $\lambda_{\tau_{off,i,s,m}}$ entsprechend der Gleichung (3.2) ergibt sich zu:

$$\tau_{i,s,m} = (k_{i,m} + \lambda_{k_{i,m}}) \cdot U_{i,m} + (\tau_{off,i,s,m} + \lambda_{\tau_{off,i,s,m}}) \quad \text{mit } i = 1, \dots, 7 \text{ und } m = 1, 2. \quad (4.37)$$

Für die Vollbrücken, die zur Messung der Drehmomente der Dreh-Gelenke 1, 5 und 7 dienen, wird diese Fehlermodellierung zunächst als ausreichend angenommen. Der Grund hierfür ist, dass die DMS präzise auf eine bestimmte Höhe mit der festgelegten Ausrichtung geklebt werden können. Bei den anderen Gelenken werden noch zusätzliche Fehler angenommen. Beim Koppelgelenk 2/3 besteht die Möglichkeit, dass eine Vollbrücke nicht exakt das Moment um die jeweilige Achse misst. Dies könnte auf Klebefehler zurückzuführen sein. Abbildung 4.4

zeigt die Draufsicht auf den Sensorkörper des Koppelgelenks 2/3 und veranschaulicht die Abweichungen der Lage der gemessenen Drehmomente von der Lage, die von der Kinematik beschrieben wird.

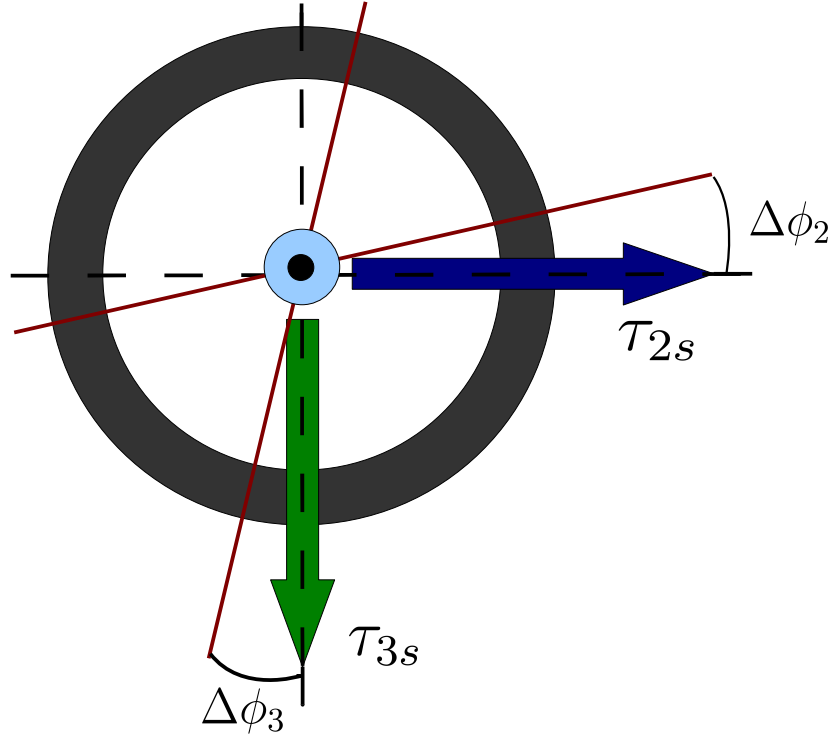


Abbildung 4.4.: Abweichung der Achse des gemessenen Drehmomentes von der, durch die Kinematik beschriebenen, Achse

Durch eine neue Formulierung der Gleichungen kann dieser Fehler berücksichtigt werden. Zusätzlich wird eine verbesserte Auflösung des Drehmomentes erwartet. Die folgenden Gleichungen beinhalten die neue Formulierung der Berechnung der Momente $\tau_{2,s}$ und $\tau_{3,s}$.

$$\tau_{2,s} = \tau_{2,s} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \lambda_{\Delta\phi_2}\right) + \tau_{3,s} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \lambda_{\Delta\phi_3}\right) \quad (4.38)$$

$$\tau_{3,s} = \tau_{2,s} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \lambda_{\Delta\phi_2}\right) + \tau_{3,s} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \lambda_{\Delta\phi_3}\right) \quad (4.39)$$

Hierbei ergeben sich $\tau_{2,s}$ und $\tau_{3,s}$ gemäß Gleichung (4.37) und enthalten bereits Fehler $\lambda_{k_{i,m}}$ des Verstärkungsfaktors, sowie des Offsets. $\lambda_{\Delta\phi_i}$ bezeichnet den Klebefehler.

Ein ähnlicher Fehler $\lambda_{\Delta\phi_{a,m}}$ ist in den Sensorkörpern der Koppelgelenke 4/5 und 6/7 zu erwarten. Folgende Gleichung soll den Zusammenhang verdeutlichen.

$$\tau_a = \tau_{a,1} \cdot \cos\left(\left(q_{a+1} - \frac{\pi}{4}\right) + \lambda_{\Delta\phi_{a,1}}\right) - \tau_{a,2} \cdot \sin\left(\left(q_{a+1} - \frac{\pi}{4}\right) + \lambda_{\Delta\phi_{a,2}}\right) \text{ mit } a = 4, 6 \quad (4.40)$$

Auch diese Fehler sind auf die Klebungen während der Fertigung des Sensors zurückzuführen.

Mit dem in Abschnitt 4.2 beschriebenen Ansatz ergeben sich weitere Unbekannte, die den Schwerpunktsvektor der verschiedenen Massen s_{load} betreffen. Dieser wird benötigt um die

Drehmomente bzgl. der Sensoren zu berechnen. Durch die Konstruktion eines geeigneten Kalibrationstools, bei dem sich der Massenschwerpunkt bei Verwendung verschiedener Lasten nicht ändert, ergeben sich lediglich 3 zusätzliche Parameter von \mathbf{s}_{load} .

Somit ergibt sich ein Vektor der zu identifizierenden Parameter \mathbf{p}_τ mit 12 Verstärkungsfaktoren und Sensoroffsets. Dazu kommen 6 Winkelabweichungen bzgl. der Sensorkörper der Koppelgelenke. Der Vektor \mathbf{s}_{load} hat weitere 3 Komponenten. Insgesamt ergeben sich 33 zu identifizierende Parameter.

4.2.2. Identifikation der Sensorparameter mittels eines linearisierten Kalibrationsmodells

In diesem Abschnitt wird ein lineares Gleichungssystem hergeleitet, welches zur Identifikation des Parametervektors \mathbf{p}_τ dient. Die Lösung des Gleichungssystems kann durch eine lineare Optimierung mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate erfolgen. Dies vermeidet die Nachteile einer nichtlinearen Optimierung. Hierbei kann, bei Wahl schlechter Startwerte, die Lösung in ein lokales Minimum konvergieren [4].

Die Umrechnung der an den Vollbrücken anliegenden Spannungen in Drehmomente der Einheit Nm ist in Gleichung (3.2) gegeben. Aus der Berechnung des Differenzdrehmomentes $\Delta\boldsymbol{\tau}$ (vgl. Gleichung (4.34)) ist das Sensoroffset $\tau_{off,i,m}$ nicht mehr enthalten. Die Identifikation der Sensoroffsets wird in den Algorithmus zur Identifikation der Massenparameter implementiert (siehe Abschnitt 4.3). Nach der Umformulierung der Gleichungen, sowie deren vektorieller Schreibweise für die redundanten Drehmomentensensoren der Achsen 1, 5 und 7 folgt dann:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{a,1} \\ \Delta U_{a,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\tau_{a,1} & 0 \\ 0 & \Delta\tau_{a,2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{k_{i,1}} \\ \frac{1}{k_{i,2}} \end{bmatrix} \text{ mit } a = 1, 5, 7. \quad (4.41)$$

Dieses Gleichungssystem hat bereits eine lineare Form und ist somit mittels der Pseudoinversen lösbar. Die Lösung für die zu identifizierenden Verstärkungsfaktoren muss nur noch invertiert werden.

Die in Abschnitt 4.2.1 formulierten Gleichungen (4.38) und (4.39) bzgl. des Drehmomentensensors des Koppelgelenks 2/3 enthalten trigonometrische Terme in denen zu identifizierende Parameter enthalten sind. Zur Formulierung dieser Gleichungen in der Form $\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x}$ sind jene Parameter zu isolieren. Dies erfolgt durch das folgende Additionstheorem gemäß [22].

$$\begin{aligned} \sin(x \pm y) &= \sin(x) \cos(y) \pm \sin(y) \cos(x) \\ \cos(x \pm y) &= \cos(x) \cos(y) \pm \sin(x) \sin(y) \end{aligned} \quad (4.42)$$

Nach Anwendung des Additionstheorems und das Einsetzen der Gleichung (3.2) in (4.38) und (4.39), sowie die Bildung des Differenzenmomentes, ergibt sich in vektorieller Schreibweise folgende Gleichung.

$$\begin{bmatrix} \Delta\tau_{2,s} \\ \Delta\tau_{3,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_{s2} & \Delta U_{s3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta U_{s2} & \Delta U_{s3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_{s2} \cdot \cos(\Delta\phi_{s2}) \\ k_{s3} \cdot \sin(\Delta\phi_{s3}) \\ k_{s2} \cdot \sin(\Delta\phi_{s2}) \\ k_{s3} \cdot \cos(\Delta\phi_{s3}) \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

Durch die trigonometrischen Zusammenhänge der 4 identifizierenden Größen, können die einzelnen zu identifizierenden Parameter des Koppelgelenks 2/3 über die Tangens-Funktion berechnet werden.

Die allgemeine Form der nichtlinearen Gleichungen, die zur Berechnung der Drehmomente um die Achsen der Gelenke 4 und 6 aus den gemessenen Drehmomenten dienen, die an den Achsen der Vollbrücken anliegen, ist in folgender Gleichung (4.44) gegeben.

$$\tau_a = \tau_{a,1} \cdot \cos(q_{a+1} - \frac{\pi}{4}) - \tau_{a,2} \cdot \sin(q_{a+1} - \frac{\pi}{4}) \text{ mit } a = 4, 6 \quad (4.44)$$

Durch die in Abschnitt 4.2.1 beschriebene mögliche Abweichung der Klebung der DMS ergibt sich die folgende Variation obiger Gleichung.

$$\tau_a = \tau_{a,1} \cdot \cos((q_{a+1} - \frac{\pi}{4}) + \Delta\phi_{a,1}) - \tau_{a,2} \cdot \sin((q_{a+1} - \frac{\pi}{4}) + \Delta\phi_{a,2}) \text{ mit } a = 4, 6 \quad (4.45)$$

Hierbei sind die zu identifizierenden Parameter $\Delta\phi_{a,1}$ und $\Delta\phi_{a,2}$ in einer nichtlinearen trigonometrischen Funktion enthalten. Zudem ist in der Funktion die abtriebsseitige Position des darauffolgenden Roboterglieds q_{a+1} enthalten, was nicht konstant ist. Durch die Verwendung des Additionstheorems aus Gleichung können die Parameter $\Delta\phi_{a,1}$ und $\Delta\phi_{a,2}$ aus den trigonometrischen Termen extrahiert werden. Hierbei bleiben sie allerdings trigonometrische Größen. Folgende Gleichung stellt das Ergebnis nach Anwendung des Additionstheorems aus Gleichung (4.42) dar.

$$\begin{aligned} \tau_a = & \tau_{a,1} \cdot \left[\cos(q_{a+1} - \frac{\pi}{4}) \cdot \cos(\Delta\phi_{a,1}) - \sin(q_{a+1} - \frac{\pi}{4}) \cdot \sin(\Delta\phi_{a,1}) \right] \\ & - \tau_{a,2} \cdot \left[\sin(q_{a+1} - \frac{\pi}{4}) \cdot \cos(\Delta\phi_{a,2}) + \cos(q_{a+1} - \frac{\pi}{4}) \cdot \sin(\Delta\phi_{a,2}) \right] \end{aligned} \quad (4.46)$$

Unter der Annahme, dass die Winkelabweichungen sehr gering sind, ist eine Linearisierung nach der Kleinwinkelnäherung zulässig.

$$\sin(\Delta\phi_{a,m}) \approx \Delta\phi_{a,m} \quad (4.47)$$

$$\cos(\Delta\phi_{a,m}) \approx 1 \quad (4.48)$$

Das Ergebnis der Linearisierung ist in Gleichung (4.49) dargestellt.

$$\begin{aligned} \tau_a = & \tau_{a,1} \cdot \left[\cos(q_{a+1} - \frac{\pi}{4}) - \sin(q_{a+1} - \frac{\pi}{4}) \cdot \Delta\phi_{a,1} \right] \\ & - \tau_{a,2} \cdot \left[\sin(q_{a+1} - \frac{\pi}{4}) + \cos(q_{a+1} - \frac{\pi}{4}) \cdot \Delta\phi_{a,2} \right] \end{aligned} \quad (4.49)$$

Durch das Einsetzen der Gleichung (3.2) und die Bildung des Differenzenmomentes entfallen auch hier die Sensoroffsets. Durch die Formulierung in Matrizenform ergibt sich folgender Zusammenhang gemäß einer linearen Gleichung analog zu $b = \mathbf{a}\mathbf{x}$. Hierbei werden die Cosinus-Funktion mit C und die Sinus-Funktion mit S abgekürzt.

$$\Delta\tau_a = \begin{bmatrix} \Delta U_{a,1} \cdot C(q_{a+1} - \frac{\pi}{4}) \\ -\Delta U_{a,1} \cdot S(q_{a+1} - \frac{\pi}{4}) \\ -\Delta U_{a,2} \cdot S(q_{a+1} - \frac{\pi}{4}) \\ -\Delta U_{a,2} \cdot C(q_{a+1} - \frac{\pi}{4}) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} k_{a,1} \\ k_{a,1} \cdot \Delta\phi_{a,1} \\ k_{a,2} \\ k_{a,2} \cdot \Delta\phi_{a,2} \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

Durch obenstehenden Zusammenhang zwischen gemessenem und berechnetem Differenzenmoment sind die gesuchten Parameter mittels linearer Optimierungsverfahren und einer Vielzahl an Messwerten näherungsweise zu berechnen.

Die Gleichungssysteme (4.41), (4.43) und (4.50) setzen die Berechnung des Differenzenmomentes voraus. Dies ist allerdings nur möglich, wenn der Massenschwerpunkt der sich ändernden Masse bekannt ist (siehe Abschnitt 4.2.1). Die Massendifferenz selbst kann durch Wiegen bestimmt werden. Zur Identifikation des Massenschwerpunktes und gleichzeitige Identifikation der Drehmomentensensoren auf dem Sensorkörper von Koppelgelenk 6/7 dient der folgende Algorithmus. Das Differenzenmoment bzgl. des Sensorkoordinatensystems $\mathbf{K}\mathbf{S}_{\tau_s,6,7}$ berechnet sich wie folgt:

$$\Delta\boldsymbol{\tau}_{s,6,7} = \Delta m_{load} \cdot \mathbf{g}_7^* \cdot \mathbf{s}_{load} \quad (4.51)$$

Eingesetzt in die bereits hergeleiteten Gleichungssysteme ergibt sich

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{s7,1} \\ \Delta U_{s7,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta m g_{7,x} & -\Delta m g_{7,y} \\ \Delta m g_{7,x} & -\Delta m g_{7,y} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{k_{s7,1}} s_{load,y} \\ \frac{1}{k_{s7,1}} s_{load,x} \\ \frac{1}{k_{s7,2}} s_{load,y} \\ \frac{1}{k_{s7,2}} s_{load,x} \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

und

$$\Delta m \cdot g_{7,x} \cdot s_z = \begin{bmatrix} \Delta U_{6,1} \cdot C(q_7 - \frac{\pi}{4}) \\ -\Delta U_{6,1} \cdot S(q_7 - \frac{\pi}{4}) \\ -\Delta U_{6,2} \cdot S(q_7 - \frac{\pi}{4}) \\ -\Delta U_{6,2} \cdot C(q_7 - \frac{\pi}{4}) \\ -\Delta m \cdot g_{7,z} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} k_{6,1} \\ k_{6,1} \cdot \Delta\phi_{6,1} \\ k_{6,2} \\ k_{6,2} \cdot \Delta\phi_{6,2} \\ s_x \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

Durch die Lösung der Gleichungen (4.52) und (4.53) können auch die x- und y-Komponente des Massenschwerpunktvektors bestimmt werden. Die einzige Größe, die bekannt sein muss ist die z-Komponente. Diese ist so in der Konstruktion zu berücksichtigen, dass sie sehr genau gefertigt und gemessen werden kann. Eine detaillierte Beschreibung der Konstruktion des Kalibrationstools erfolgt in Kapitel 6.

Nach der Aufnahme der Messungen zur Drehmomentensensorkalibration sind zunächst die Gleichungssysteme (4.52) und (4.53) zu lösen. Daraufhin können die Differenzenmomente berechnet werden und zur Lösung der übrigen Gleichungssysteme bzgl. der Sensoren des Gelenks 1, sowie der Koppelgelenke 2/3 und 4/5 verwendet werden.

Auch für diese Gleichungssysteme sind die identifizierbaren Parameter und Konditionierung über eine Beobachtungsmatrix bzw. Jacobimatrix \mathbf{J}_τ aus allen Kalibrationsposen ermittelbar. Hierfür nutzt man die in Gleichung (4.36) angedeutete Fehlergleichung

$$e_\tau = \sum_{j=1}^k (\Delta\boldsymbol{\tau}_{robot}(\mathbf{x}_j, \mathbf{p}_\tau) - \Delta\boldsymbol{\tau}_{model}(\mathbf{x}_j))^2 \quad (4.54)$$

und leitet partiell nach \mathbf{p}_τ ab.

$$\mathbf{J}_\tau = \frac{\partial e_\tau}{\partial \mathbf{p}_\tau} \quad (4.55)$$

Durch die QR-Zerlegung und Untersuchung der Hauptdiagonalelemente der oberen Dreiecksmatrix \mathbf{R} können die nicht identifizierbaren Parameter determiniert werden. Dies erfolgt analog zu dem Verfahren, dass in Abschnitt 2.4 vorgestellt wurde. Zusätzlich dient die Betrachtung der Singulärwerte der Untersuchung der Minimierungsprobleme.

4.2.3. Posenplanung zur Drehmomentensensor-Kalibration

Der Ansatz, der bei der Posenplanung für die Kalibration der Drehmomentensensoren verfolgt wird, beinhaltet die Erzeugung von Drehmomenten um die Sensorachsen, so dass der gesamte Arbeitsbereich abgedeckt wird. So soll die Drehmomente von den minimal zu den maximal möglichen Drehmomenten bzgl. der einzelnen Vollbrückenschaltungen variiert werden. Zur Umsetzung der automatischen Generierung entsprechender Posen wurde eine Funktion in Matlab implementiert. Diese berechnet diejenige Gelenkkonfiguration, die das höchst mögliche Drehmoment repräsentiert, dass unter bestimmten Randbedingungen erreicht werden kann. Die Eingangsgrößen der Funktion sind die Gelenklaufvariable i , wobei $i \in [1, \dots, 7]$ gilt, der Gravitationsvektor \mathbf{g}_{Base} bzgl. der Roboterbasis und die Anzahl der Posen, die bzgl. der Anregung eines bestimmten Gelenks generiert werden sollen. Da der Roboter zur Anregung eines Drehmomentes um Gelenk 1, so positioniert werden sollte, dass die Achse 1 nicht parallel zum Gravitationsvektor steht, ist der Gravitationsvektor eine entscheidende Größe. Innerhalb der Funktion werden die globalen Variablen, wie die Gelenklaufweiten (vgl. Tabelle 3.2), die DH-Parameter und Massenparameter des Roboters und Endeffektor-Tools, sowie die maximal zulässigen Drehmomente genutzt (vgl. Tabelle 3.3). Die maximal zulässigen Drehmomente dienen der Warnung des Anwenders im Falle einer Überschreitung. Die Massenparameter des Endeffektortools sind aus ähnlichen Gründen entscheidend, wie die Orientierung des Gravitationsvektors zur Roboterbasis. Nur durch einen exzentrisch zur Achse des Gelenks 7 gelegenem Massenschwerpunkt, kann ein Drehmoment um diese Achse erzeugt werden.

Die erste Aufgabe der Funktion ist es, diejenige Pose $\mathbf{q}_{T_i, max}$ in Gelenkkoordinaten zu finden, die das maximale Moment um das gewählte Gelenk verursacht. Hierfür wird zunächst die Gelenklaufweite des gewählten Gelenks in eine bestimmte Anzahl Gelenkwinkeln bzw. Positionen diskretisiert. Die generierten Posen werden dem rekursiven Newton-Algorithmus übergeben und die Drehmomente bestimmt. Hierbei bleiben die Gelenkkonfigurationen der anderen Posen konstant. Von den entstandenen Drehmomenten wird das Maximum bzgl. des gewählten Gelenks ermittelt. In der Nähe der Gelenkposition bzgl. des maximalen Drehmomentes wird die Auflösung erhöht und eine erneute Berechnung der Drehmomente durchgeführt. Sobald keine Steigerung des Drehmomentes mehr erzielt wird oder die Grenze der Gelenklaufweite erreicht ist, wird das gleiche Verfahren mit dem darauffolgenden Gelenk durchgeführt. Bei der Ermittlung des maximalen Drehmomentes wird stets das gewählte Gelenk i verwendet.

Das Verfahren wird so lange wiederholt, bis keine Veränderung einer Achskonfiguration zu einer Steigerung des Drehmomentes um die gewählte Achse führt. Das vorläufige Ergebnis der Funktion ist das maximale Drehmoment, welches abhängig von der Orientierung des Gravitationsvektors zur Roboterbasis und dem verwendeten Endeffektor-Tool, möglich ist.

Die Variation der Drehmomente von den minimal bis maximal möglichen Drehmomenten um die gewählte Achse, kann bei allen Gelenken auf die gleiche Weise erfolgen. Hierbei wird

das jeweilige Gelenk lediglich um die gewählte Achse mit der gewünschten Anzahl Posen rotiert.

Elastizitätskompensation

Die Elastizitäten der Gelenke spielen bei der kartesischen Pose-Genauigkeit eine entscheidende Rolle. Durch die Verwendung verschiedener Massen am Endeffektor-Tool, kann ohne zusätzliche Planung nicht die gleiche kartesische Pose mit der gleichen Gelenkkonfiguration erreicht werden. Hierfür wird im folgenden Blockschaltbild 4.5 eine Methode zur Kompensation der Gelenkelastizitäten veranschaulicht. Das Blockschaltbild führt ebenso direkt auf den Ansatz zur Kalibration der Drehmomentensensoren, wie in der Einführung dieses Abschnitts 4.2 vorgestellt. Die grünen Pfeile deuten auf die genaue Kenntnis der jeweiligen Daten hin. Die Roten Pfeile im oberen Teil nach der Berechnung des dynamischen Modells deuten auf die Abhängigkeit von den nicht kalibrierten Massenparametern hin.

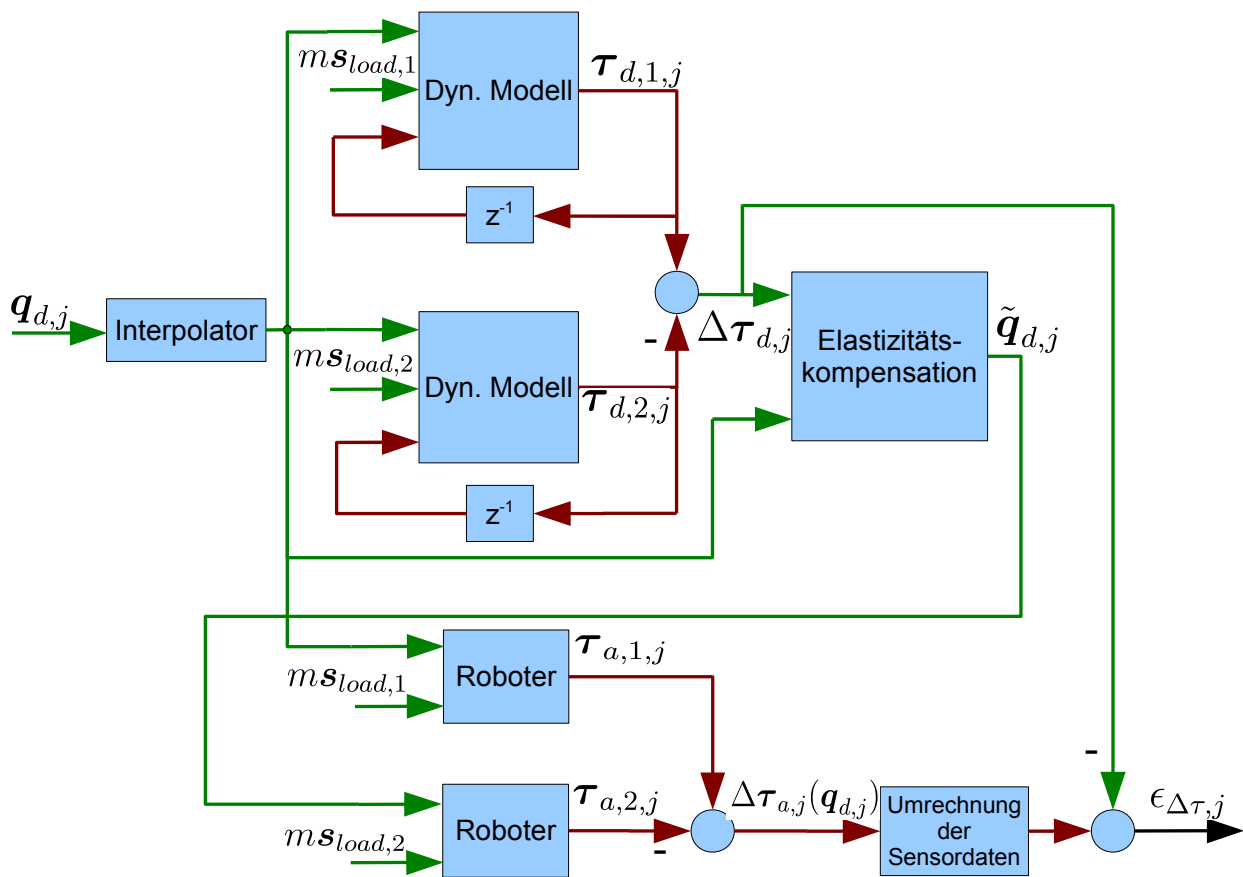


Abbildung 4.5.: Kompensation der Elastizität für die Kalibration der Drehmomentensensorik

Entsprechend dem Blockschaltbild ist die Elastizitätskompensation in Simulink durchzuführen. Als Eingangsgröße erhält ein Interpolator die geplante Gelenkkonfiguration $\mathbf{q}_{d,j}$. Hierdurch resultiert eine Bahn von der aktuellen Stellung des Roboters zu der gewünschten Konfiguration. In jedem Simulationsschritt werden die erwarteten Drehmomente unter

Verwendung zweier Massen durch den rekursiven Newton-Algorithmus ermittelt. Die kinematischen Beziehungen werden in dem Algorithmus bereits unter Einbezug der Elastizitäten berechnet. Durch die Übermittlung des Drehmomentes aus dem vorhergegangenen Simulationsschritt kann das Drehmoment, das zur Berechnung der erweiterten Direkten Kinematik nötig ist, näherungsweise übermittelt werden. Sobald der Ausgang des Interpolators mit der geplanten Gelenkkonfiguration übereinstimmt wird die Differenz der zu erwartenden Drehmomente $\tau_{d,j,1}$ und $\tau_{d,j,2}$ gebildet. Hierdurch kann der Anteil der Massenparameter des Roboters eliminiert werden (vgl. Gleichung (4.34)). Die geplante Pose $\mathbf{q}_{d,j}$, sowie das Differenzmoment $\Delta\tau_{d,j}(\mathbf{q}_{d,j})$ werden durch die Elastizitätskompensation mittels folgender Gleichung (4.56) zu $\tilde{\mathbf{q}}_{d,j}$ umgerechnet.

$$\tilde{\mathbf{q}}_{d,j} = \mathbf{q}_{d,j} + \mathbf{K}^{-1} \cdot \Delta\tau_{d,j}(\mathbf{q}_{d,j}) \quad (4.56)$$

Wird der Roboter nun auf die Gelenkkonfiguration $\mathbf{q}_{des,j}$ mit der einen Masse und auf $\tilde{\mathbf{q}}_{des,j}$ mit der zweiten Masse gesteuert sollte die gleiche kartesische Pose des Roboters resultieren.

4.2.4. Untersuchung der Drehmomentensensorik hinsichtlich eines Temperaturdrifts und Möglichkeit der Kompensation

Zur Untersuchung hinsichtlich eines Temperaturdrifts der Drehmomentensensoren können drei verschiedene Posen wiederholt angefahren werden. Diese Posen werden so gewählt, dass zwei Gelenkkonfigurationen die Drehmomente maximal bzw. minimal anregen. Die dritte soll möglichst kein Drehmoment um die Gelenkachsen aufbringen. Die Planung der Posen kann ebenso über den in Abschnitt 4.2.3 vorgestellten Algorithmus durchgeführt werden.

Während des wiederholten Anfahrens der Posen werden die Temperatursensoren, die sich nahe den Drehmomentensensoren befinden, sowie die jeweils anliegenden Drehmomente aufgezeichnet. Hierdurch kann der Einfluss der Temperatur überprüft werden.

Aufgrund der Erfahrungen beim DLR hinsichtlich der Drehmomentensensoren des LBR III wird eine variierende Steigung, sowie ein variierender Offset der Sensoren erwartet.

Zur Kompensation wurde für den LBR bereits ein Ansatz entwickelt der die Umrechnung der Spannungen abhängig von der anliegenden Temperatur ermöglicht.

$$\tau_{is,m} = U_{is,m} \cdot k_{is,m} (1 + c_{is,m,1}(T_{is} - T_{0,is})) + \tau_{off,is,m} + c_{is,m,2}(T_{is} - T_{0,is}) \quad (4.57)$$

Hierbei beschreiben $c_{is,m,1}$ und $c_{is,m,2}$ die Faktoren für die Verstärkungsfaktoren bzw. Sensoroffsets, die diese abhängig von der Differenz der aktuellen Temperatur und der Kalibrations-Temperatur entsprechend variieren.

4.3. Identifikation der Massenparameter des MIRO

Zur Umsetzung von verschiedenen Regelungsansätzen, wie der Gravitationskompensation und der Kollisionsdetektion oder Applikationen wie der Schätzung von externen Belastungen ist es nötig die inverse Roboterdynamik mit hoher Genauigkeit zu berechnen [8]. Hierfür werden neben der Roboterkinematik die Trägheitsparameter wie Massen, Massenschwerpunkte und Trägheitsmomente benötigt. Diese werden zur Zeit aus den CAD-Daten des Roboters extrahiert und werden bzgl. der Kinematik definiert, die ebenso aus den Konstruktionszeichnungen entnommen wird. Nach der Kalibration der Roboterkinematik entspricht die verwendete Kinematik nicht mehr derjenigen aus den CAD-Daten. Hieraus folgt, dass auch die Trägheitsparameter bzgl. dieser neuen Kinematik genutzt werden sollten. In heutigen CAD-Tools ist es möglich die Trägheitsparameter mit guter Näherung zu bestimmen. Dennoch ergeben sich Abweichungen zu den realen Parametern. Der Grund hierfür ist, dass einige Komponenten des Roboters, wie Kabelbäume, etc. nur mit viel Aufwand und wenig erfolgversprechend im CAD-Modell implementiert werden können. Desweiteren können weitere Abweichungen durch Fertigungstoleranzen oder variierende Werkstoffeigenschaften entstehen.

Die Summe der oben beschriebenen Fehlerquellen kann zu Ungenauigkeiten in der Determinierung der Trägheitsparameter aus den Konstruktionsdaten führen, die bis zu 5% betragen können [4]. Der Anspruch, die entwickelten Regelungsansätze effektiv am Robotersystem umzusetzen, erfordert eine Identifikation der Trägheitsparameter am Gesamtsystem des Roboters, analog zu dem Verfahren, welches in Abschnitt 2.4 beschrieben wurde.

Bei dem Betrieb des MIRO mit einem Drehmomentenregler, können verschiedene Applikation durchgeführt werden, bei denen der Anwender den Roboter direkt durch das manuelle Führen der Strukturteile in einem gewünschten Taskspace verfahren kann. Zur Detektion der gewünschten Bewegungsrichtung, wird die Berechnung der Drehmomente benötigt. Diese werden mit den durch die Sensoren gemessenen Drehmomenten verglichen. Durch die Größenunterschiede der gemessenen und berechneten Drehmomentenvektoren kann die gewünschte Richtung ermittelt werden. Gleichzeitig zu der geführten Bewegung wird die Gravitationskompensation durchgeführt, damit der Roboter durch die Antriebsmomente der Motoren stabil gehalten wird. Hierfür sind vor allem die Massen und Massenschwerpunkte von Bedeutung, die die regelbaren Drehmomente beeinflussen. Aus diesem Grund und der ersten Annäherung des Massenmodells an die Realität, sollen mit diesem Verfahren die Massen und Massenschwerpunkte identifiziert werden können.

Nach der Kalibration der Roboterkinematik und der Drehmomentensensorik, besteht die Möglichkeit die Drehmomente mit erhöhter Genauigkeit zu detektieren. Allerdings wurden die Offsets der Drehmomentensensoren bisher noch nicht identifiziert. Daraus folgt, dass diese in die im folgenden beschriebene Identifikation mit einbezogen werden müssen. Der Ansatz hierfür lautet:

$$\min_{p_M, \tau_{off}} \sum_{j=1}^k [\tau_j(\mathbf{U}_j, \mathbf{k}) - (\tau_{robot,j}(p_M) - \tau_{off,j})]^2. \quad (4.58)$$

Hierbei repräsentiert das $\tau_j(\mathbf{U}_j, \mathbf{k})$ die Drehmomente, die durch die Umrechnung der gemessenen Spannungen mittels der bereits identifizierten Parametern an den Sensorachsen anliegen.

Durch die Bildung der Differenz mit den berechneten Drehmomenten, von denen die die Offsets der Sensoren bereits abgezogen wurden, ergeben sich Fehler. Diese hängen von den zu identifizierenden Parametern ab.

In den folgenden Abschnitten werden die Fehler modelliert, die aus den oben beschriebenen Abweichungen resultieren (Abschnitt 4.3.1). Darauf folgt die Anpassung des in Abschnitt 2.4 beschriebenen linearen Kalibrationsmodells für die Massenparameteridentifikation, auf die Masseneigenschaften des MIRO, sowie der Offsets der Drehmomentensensoren (Abschnitt 4.3.2).

4.3.1. Modellierung der Fehler im statischen Kraftmodell

Bei Industrierobotern oder Robotern wie dem LBR des DLR werden die Drehmomente entweder über die Motorströme berechnet oder mittels einer Drehmomentensensorik direkt im Gelenk gemessen. Für diese Roboter sind vier Massenparameter je Roboterglied nötig, um die Dynamik zu berechnen. Die Parameter setzen sich aus der jeweiligen Masse des Roboterglieds und 3 Komponenten des Schwerpunktvektors zusammen. Sodass sich insgesamt die Anzahl der Massenparameter p_M wie folgt ergibt.

$$p_M = 4 \cdot n \quad (4.59)$$

Durch die Lage der Drehmomentensensoren beim Medizinroboter MIRO sind diese Parameter nicht ausreichend. In den Robotergliedern 3, 5 und 7 werden nicht alle Masseneigenschaften des Roboterglieds durch die Drehmomentensensoren des jeweiligen Glieds erfasst. So müssen bei diesen Robotergliedern weitere 4 Massenparameter mit Masse und Schwerpunktskoordinaten für die Masseneigenschaften des proximal zum Drehmomentensensor liegenden Teils des Roboterglieds identifiziert werden. Somit ergibt sich mit der Anzahl der Freiheitsgrade $n = 7$, die der Anzahl an Robotergliedern entspricht, 40 Parameter, die es zu identifizieren gilt.

Die Drehmomente werden durch den rekursiven Newton-Algorithmus vom letzten bis zum ersten Gelenk berechnet. Hierdurch haben die Drehmomente, die an distalen Gelenken angreifen auch Einfluss auf die Drehmomente, die an weiter proximal gelegenen Gelenken wirken. Somit werden Fehler in den Massenparametern bzgl. der distalen Roboterglieder auf die Berechnung der proximalen Drehmomente übertragen.

Der Belastungsvektor \mathbf{w}_i bzgl. eines Gelenks i berechnet sich unter Berücksichtigung der Fehler in den Massenparametern, gemäß Gleichung (2.44), wie folgt:

$$\mathbf{w}_i(\lambda_{m_v}, \lambda_{s_v}) = \begin{bmatrix} (m_i + \lambda_{m_i}) \cdot \mathbf{g}_i \\ (m_i + \lambda_{m_i}) \cdot (\mathbf{s}_i + \lambda_{s_i}) \times \mathbf{g}_i \end{bmatrix} + (\mathbf{\Gamma}_{i+1}^i)^T \cdot \mathbf{w}_{i+1}(\lambda_{m_u}, \lambda_{s_u}) \quad (4.60)$$

mit $u = i + 1, \dots, n$ und $v = i, \dots, n$.

Die Offsets der Drehmomentensensoren sind für jede Vollbrückenschaltung von DMS zu modellieren. Somit ergeben sich 12 weitere Parameter. Die hieraus resultierenden Fehler wurden mathematisch bereits in Abschnitt 4.2.1 modelliert.

4.3.2. Identifikation der Massenparameter mittels eines linearem Kalibrationsmodells

Die Identifikation der Massenparameter des MIRO erfolgt auf Basis des linearen Kalibrationsmodells aus Abschnitt 2.4. Wie oben beschrieben ergeben sich zusätzliche Parameter, die in der Koeffizientenmatrix mit einbezogen werden müssen. Zur Berücksichtigung der Offsets der Drehmomentensensorik bzw. der einzelnen Vollbrückenschaltungen, werden die Hauptdiagonalelemente der Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_{ii} bzgl. der Roboterglieder $i = 1, 3, 5, 7$ mit weiteren Spalten versehen. Der Parametervektor erhält ebenso weitere Einträge. In den folgenden Gleichungen wird das Produkt der erweiterten Koeffizienten $\mathbf{A}_{ii,s}$ mit den entsprechenden Parametervektoren angegeben. Das Produkt stellt den Belastungsvektor \mathbf{w}_i dar. Dieser entspricht den Reaktionskräften und -momenten, die ausschließlich durch die Masseneigenschaften des auf das jeweilige Gelenk folgende Roboterglied resultieren. Zu beachten gilt es, dass die Koeffizienten \mathbf{A}_{ii} gemäß Gleichung (2.49) berechnet werden und eine Matrix der Dimension $\mathbb{R}^{6 \times 4}$ darstellen.

Die Offsets der Drehmomentensensoren von Gelenk 1, 2 und 3 werden zu einem Mittelwert der zwei Offset zusammengefasst, da durch die Mittelwertbildung der beiden gemessenen Drehmomente nicht die genaue Kenntnis beider Offsets erforderlich ist. Der entsprechenden Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_{11} wird eine weitere Spalte zugefügt (Gleichung (4.61)). Somit lautet die Koeffizientenmatrix $\mathbf{A}_{11,s}$:

$$\mathbf{w}_{1,s} = \underbrace{\left[\begin{array}{c|c} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{0}_{5 \times 1} \\ \hline & -1 \end{array} \right]}_{\mathbf{A}_{11,s}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} m_1 \\ s_{1,x} \\ s_{1,y} \\ s_{1,z} \\ \bar{\tau}_{off,1} \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}_{1,s}}. \quad (4.61)$$

Die resultierende Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_{MIRO} wird in Gleichung (4.64) zur Berechnung der Drehmomente $\boldsymbol{\tau}_j(\mathbf{U}_j, \mathbf{k})$ dargestellt.

Die Berücksichtigung der Offsets der Vollbrückenschaltungen bzgl. der Gelenke 2 und 3 erfolgt über 2 zusätzliche Spalten in der Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_{33} . Die Koeffizientenmatrix $\mathbf{A}_{33,s}$ für den distalen Anteil des Roboterglieds ergibt sich somit zu:

$$\mathbf{w}_{3,s} = \underbrace{\left[\begin{array}{c|cc} \mathbf{A}_{33} & \mathbf{0}_{4 \times 2} \\ \hline & -C(\Delta\phi_2), & -S(\Delta\phi_3) \\ & -S(\Delta\phi_2), & -C(\Delta\phi_3) \end{array} \right]}_{\mathbf{A}_{33,s}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} m_{3,s} \\ s_{3,s,x} \\ s_{3,s,y} \\ s_{3,s,z} \\ \tau_{off,2} \\ \tau_{off,3} \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}_{3,s}}. \quad (4.62)$$

Die Koeffizienten in den zusätzlichen Spalten dienen dem Einbezug der identifizierten Klebefehler aus der Drehmomentensensorkalibration. Für das Roboterglied 3 sind insgesamt 2

Zeilen in dem resultierendem Regressor zu nutzen (Gleichung (4.64)). Diese repräsentieren die Gleichungen für den distal und proximal zum Sensor gelegenen Teil des Strukturglieds.

Die Drehmomentensensoren der Koppelgelenke 4/5 und 6/7 bestehen jeweils aus 4 Vollbrückenschaltungen, wobei die Offsets bzgl. der Achsen 5 und 6 wiederum gemittelt werden. Somit sind insgesamt 3 weitere Spalten der Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_{ii} mit $i \in [5, 7]$ zuzufügen, um die Offsets identifizieren zu können.

$$\mathbf{w}_{i,s,1} = \underbrace{\left[\begin{array}{c|ccc} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \\ \mathbf{A}_{ii} & C(q_i - \frac{3\pi}{4} + \Delta\phi_{i-1,1}), & -S(q_i - \frac{3\pi}{4} + \Delta\phi_{i-1,2}), & 0 \\ & C(q_i - \frac{3\pi}{4} + \Delta\phi_{i-1,1}), & -S(q_i - \frac{3\pi}{4} + \Delta\phi_{i-1,2}), & 0 \\ & 0, & 0, & -1 \end{array} \right]}_{\mathbf{A}_{ii,s}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} m_{i,s} \\ s_{i,s,x} \\ s_{i,s,y} \\ s_{i,s,z} \\ \tau_{off,i-1,1} \\ \tau_{off,i-1,2} \\ \bar{\tau}_{off,i} \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}_{i,s}} \quad (4.63)$$

Auch hier werden die Anteile der Drehmomentensensoroffsets bzgl. der beiden Vollbrückenschaltungen der 4 bzw. 6 Matrix über die entsprechenden trigonometrischen Beziehungen mittels der Koeffizienten der neuen Spalten berücksichtigt.

Die Elemente der oberen Dreiecksmatrix, die in den Spalten bzgl. der oben beschriebenen Hauptdiagonalelemente stehen, sind mit Nullspalten so aufzufüllen, dass die Dimensionen mit den Hauptdiagonalelementen übereinstimmen. Der Regressor für den MIRO ergibt sich wie folgt:

$$\mathbf{A}_{MIRO} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11,s} & \mathbf{A}_{12} & \mathbf{A}_{13} & \mathbf{A}_{13,s} & \mathbf{A}_{14} & \mathbf{A}_{15} & \mathbf{A}_{15,s} & \mathbf{A}_{16} & \mathbf{A}_{17} & \mathbf{A}_{17,s} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{22} & \mathbf{A}_{23} & \mathbf{A}_{23,s} & \mathbf{A}_{24} & \mathbf{A}_{25} & \mathbf{A}_{25,s} & \mathbf{A}_{26} & \mathbf{A}_{27} & \mathbf{A}_{27,s} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{33} & \mathbf{A}_{33,s} & \mathbf{A}_{34} & \mathbf{A}_{35} & \mathbf{A}_{35,s} & \mathbf{A}_{36} & \mathbf{A}_{37} & \mathbf{A}_{37,s} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{33,s} & \mathbf{A}_{34} & \mathbf{A}_{35} & \mathbf{A}_{35,s} & \mathbf{A}_{36} & \mathbf{A}_{37} & \mathbf{A}_{37,s} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{44} & \mathbf{A}_{45} & \mathbf{A}_{45,s} & \mathbf{A}_{46} & \mathbf{A}_{47} & \mathbf{A}_{47,s} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{55} & \mathbf{A}_{55,s} & \mathbf{A}_{56} & \mathbf{A}_{57} & \mathbf{A}_{57,s} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{55,s} & \mathbf{A}_{56} & \mathbf{A}_{57} & \mathbf{A}_{57,s} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{66} & \mathbf{A}_{67} & \mathbf{A}_{67,s} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{77} & \mathbf{A}_{77,s} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{77,s} \end{bmatrix} \cdot \quad (4.64)$$

Nach der Reduzierung des Regressors auf die Zeilen, die die messbaren Drehmomente repräsentieren, ergibt sich $\hat{\mathbf{A}}_{MIRO}$. Der Vektor der Messwerte hat folgende Form:

$$\boldsymbol{\tau}_k = \begin{bmatrix} \bar{\tau}_{1,k} \\ \tau_{2,k} \\ \tau_{3,k} \\ \tau_{4,k1,k2,\perp} \\ \tau_{4,k1,k2} \\ \bar{\tau}_{5,k} \\ \tau_{6,k1,k2,\perp} \\ \tau_{6,k1,k2} \\ \bar{\tau}_{7,k} \end{bmatrix} \cdot \quad (4.65)$$

Der Index k deutet an, dass hier die Drehmomente genutzt werden, die mit den Verstärkungsfaktoren und gegebenenfalls den Klebefehlern aus den Spannungswerten der Vollbrückenschaltungen berechnet werden.

4.3.3. Posenplanung für die Massenparameter- und Sensoroffset Identifikation

Bei der Planung von Posen, die die zu identifizierenden Massenparameter effektiv anregen, sollten die Drehmomente an den einzelnen Vollbrücken bzw. Drehmomentsensoren möglichst variantenreich vertreten sein. Hierfür kann der bereits in Abschnitt 4.2.3 beschriebene Algorithmus verwendet werden.

5. Simulationsergebnisse des Kalibrationsprozesses

Zur Überprüfung der Algorithmen zu den verschiedenen Kalibrationen werden jene in diesem Kapitel mit simulierten Daten durchgeführt. Vor der Generierung der Daten wird zunächst anhand zuvor durchgeführter Messungen das Rauschen der nötigen Sensoren und dem externen Messsystem analysiert. Hierdurch kann der Einfluss des Rauschens abgeschätzt und gegebenenfalls bei der Erstellung der Daten mit eingeschlossen werden. Je Kalibrationsverfahren werden dann die Posen, die von dem jeweiligen Posenplaner generiert wurden in ein Simulink-Modell importiert, welches das Robotersystem so gut als möglich abbildet. Es werden entsprechende Daten zur Durchführung der Kalibrationen zur Verfügung gestellt. Der erste Schritt bei der Durchführung der Simulation stellte die Überprüfung der Identifizierbarkeit der verschiedenen Parameter dar. Nach dem Ersetzen der nicht identifizierbaren Parameter mit den bisher angenommenen Eigenschaften in den Gleichungssystemen werden die Konditionierungen der Minimierungsprobleme analysiert.

5.1. Analyse des Rauschens der verwendeten Sensoren

Zur Analyse des Rauschens der Kamera wurden über eine Minute das Referenztarget, sowie das Endeffektortarget vermessen. Hierbei wurden die Targets am Roboter befestigt, wie es auch für die Messwertaufnahme für die Kalibration der Roboterkinematik geplant wurde. Der Roboter befand sich während der Messungen nicht im Betriebszustand, so dass eine mögliche Bewegung aufgrund der stabilen Positionierung vermieden werden konnte. Die Daten wurden mit einer Abtastfrequenz von 50 Hz aufgezeichnet. In Abbildung 5.1 sind drei Histogramme enthalten. Diese stellen die Häufigkeit eines Messwertes der Position abhängig von dessen Richtung und Größe dar.

Zu erkennen ist die Normalverteilung des Rauschens. Die Standardabweichung der Positionsdetektion in y-Richtung liegt unter dem vom Hersteller des Trackingssystems dokumentiertem Wert (vgl. (3.12)). In x- und z-Richtung kann für die Standardabweichung ein größerer Wert beobachtet werden. Aufgrund der Umgebungsverhältnisse während der Messwertaufnahme, die entsprechend der Vorgaben des Herstellers gestaltet wurden, sind diese als Begründung auszuschließen. Durch die Normalverteilung des Rauschens, sollte die Standardabweichung keinen nennenswerten Einfluss auf die Messwertaufnahme in statischen Positionen haben. Hier kann durch die Messung über längere Zeit und die Mittelwertbildung der Messwerte eine gute Näherung an die Genauigkeit des Systems erreicht werden.

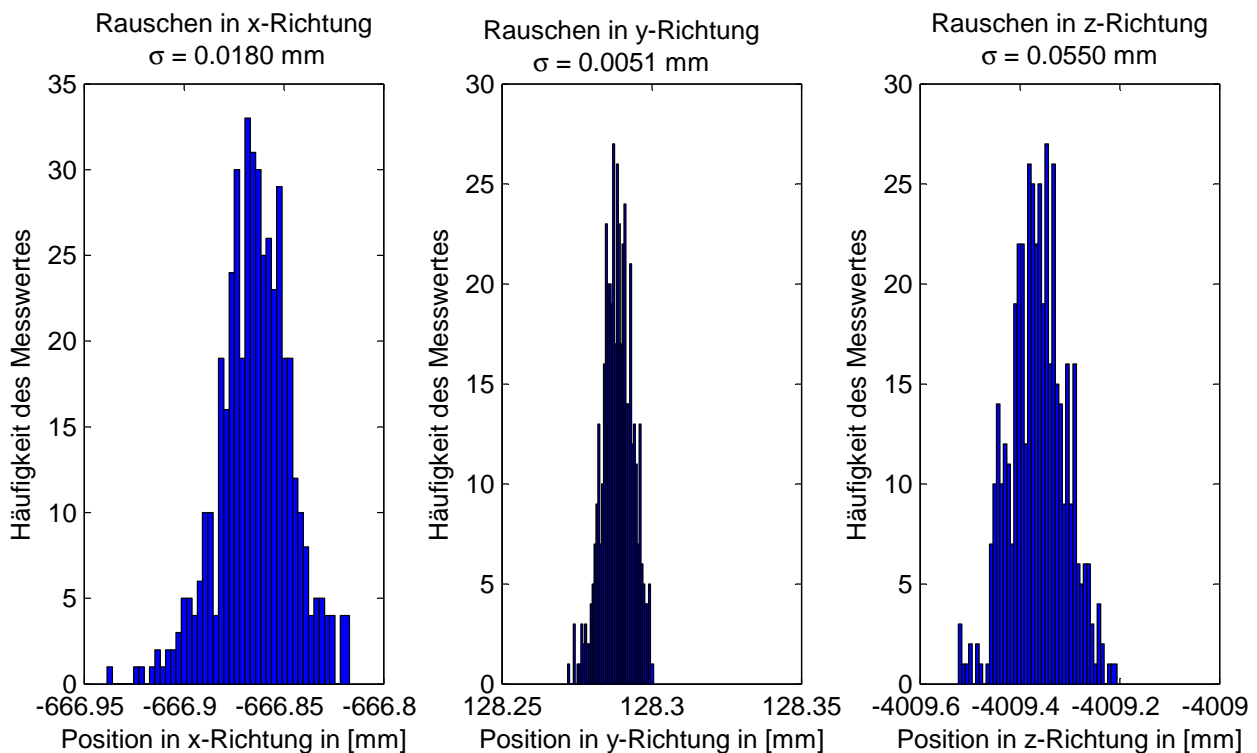


Abbildung 5.1.: Rauschanalyse eines Markers(LEDs) in drei Raumrichtungen

Bei der Verwendung mehrerer Targets und der Berechnung der 6D-Pose bzgl. eines Referenzkoordinatensystems überlagert sich das Rauschen der verwendeten Marker. Auch hier wird eine Normalverteilung der statisch aufgenommenen Messwerte beobachtet. So kann auch hier die Mittelwertbildung zur Kompensation des Rauschens eingesetzt werden.

Neben dem Trackingsystem werden die Drehmomentsensoren und die MR-Sensoren am Antrieb des Roboters für die Aufnahme von Messwerten für die einzelnen Kalibrationen benötigt. Zur Aufnahme von Messwerten mit denen eine Analyse des Rauschens vorgenommen werden kann wurde der Roboter in die Nullkonfiguration ($\mathbf{q} = \mathbf{0}$) verfahren. Danach wurde die Regelung des Roboters ausgeschaltet, so dass der Roboter allein durch die Bremsen gehalten wird. Hierdurch kann der Einfluss der Regler auf die Messwerte vermieden und ausschließlich das Rauschen beobachtet werden. Die Messwertaufnahme erfolgte mit 50 Hz und es wurde über etwa eine Minute gemessen.

Für die antriebsseitigen Positionssensoren ist kein Rauschen erkennbar. Die Standardabweichung liegt in der Nähe der numerischen Genauigkeit bei $10^{-14} rad$.

Das Rauschen der Drehmomentensensoren ist ebenso vernachlässigbar. Die Messwerte sind alle identisch. Allerdings fällt auf, dass es Störungen gibt. Die Störungen äußern sich so, dass ein bestimmter Wert, der von den Übrigen etwa im hundertstel Nm-Bereich abweicht, sporadisch mit einer Häufigkeit von ca. 5 % abhängig von der jeweiligen Vollbrückenschaltung

austritt. Dies wird während der Messungen berücksichtigt, indem diese Ausreißer aus den Messdaten eliminiert wird und erst dann die Mittelwertbildung erfolgt.

Aus den oben beschriebenen Erkenntnissen bzgl. des Rauschberhaltens der Sensoren, muss dessen Einfluss nicht mit in die Simulationen mit einbezogen werden. Für die statische Messwertaufnahme sollten die Daten über eine gewisse Zeit aufgenommen und das Rauschen durch die Mittelwertbildung kompensiert werden. Die Störungen bei der Messwertaufnahme durch die Drehmomentensensoren sollten vor der Mittelwertbildung aus dem Datensatz eliminiert werden.

5.2. Kalibration der Roboterkinematik

Bei der statischen 6D-Kalibration sollte der Parametervektor \mathbf{p}_{Kin} mit insgesamt 48 Parametern identifiziert werden (vgl. Abschnitt 4.1.4). Neben der DH-Parameter und konstanten Transformationen als rein kinematische Parameter, werden die Gelenksteifigkeiten und Struktursteifigkeiten der Drehmomentensensoren 4/5 und 6/7 mit in die Kalibration einbezogen.

Zur Erstellung der Sensordaten für die Kalibration der Roboterkinematik wird das Anfahren des Roboters von 400 Posen simuliert. Die 400 Posen werden in 4 Sets angesteuert, bei denen jeweils ein anderes Gewicht (0.7 kg, 1.1 kg, 1.8 kg, 2.7 kg) am Endeffektor simuliert wurde. Der Hebelarm der Last wurde entsprechend der Anforderung gewählt, ein Drehmoment um die Achse 7 aufzubringen. Der Hebelarm in Richtung der x-Achse des Target-Koordinatensystems wird mit 4 cm angenommen. Dies dient der Anregung der Steifigkeiten der Achse 7 und der Steifigkeitskopplung des Gelenks 6/7. Desweiteren wurde die Orientierung der Roboterbasis mit einer Rotation um die y-Achse (siehe Abbildung 3.1) von 45° gewählt. Durch die entstehenden Drehmomente um die Achse 1, soll die Steifigkeit um dieselbe Achse so angeregt werden, dass sie identifizierbar ist. Hierbei werden vom Simulink-Modell die Kameradaten als $\mathbf{T}_{Target}^{Ref}$ dem Workspace von Matlab übergeben. Neben den Kameradaten werden die antriebsseitigen Gelenkpositionen $\mathbf{q}_{\Theta,i}$, sowie die messbaren Drehmomente $\boldsymbol{\tau}_i$ generiert.

Vor der Analyse des Minimierungsproblems sind die Parameter zu skalieren. Die Skalierung dient der Verbesserung der Konditionierung des Minimierungsproblems. Je nach Kriterium der Identifizierbarkeit, kann diese auch dazu verhelfen, dass ein Parameter der zuvor als nicht identifizierbar deklariert wurde, so identifizierbar wird. Hierzu sollte die Skalierung so erfolgen, dass die einzelnen Variationen der Parameter, die in gleicher Größenordnung erfolgt, den gleichen Einfluss auf den resultierenden Fehler in der Zielfunktion hat. Mathematisch kann dieser Zusammenhang folgendermaßen formuliert werden.

$$f(\mathbf{p}_{Kin} \setminus \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_1 + \delta_p) \equiv f(\mathbf{p}_{Kin} \setminus \mathbf{p}_d, \mathbf{p}_d + \delta_p) \quad \forall d \in [2, \dots, 48] \quad (5.1)$$

Die translatorischen und rotarischen Parameter liegen durch die Wahl der Einheiten $[mm]$ und $[rad]$ im Wertebereich von $[\pm \frac{\pi}{2}]$. Durch den Wertebereich der Steifigkeiten ($[-1000, 35000]$) mit der Einheit $[\frac{Nm}{rad}]$ sollte diesbezüglich eine Skalierung erfolgen. Die Skalierung erfolgt hierbei noch manuell, indem die Singulärwerte der Jacobimatrix (vgl. Abschnitt 4.1.2) miteinander verglichen und durch entsprechende Wahl der Skalierungsfaktoren angeglichen werden. Die Skalierung kann auch im Rahmen einer Optimierung erfolgen, wobei die Startwerte dennoch

manuell geschätzt werden müssen. Das Minimierungsproblem wird wie folgt formuliert:

$$\min_{\mathbf{f}_{scale}} [f(\mathbf{p}_{Kin} \neg p_1, p_1 + \delta_p) - f(\mathbf{p}_{Kin} \neg p_d, p_d + \delta_p)]^2 \quad \forall d \in [2, \dots, 48] . \quad (5.2)$$

Hierbei wird der Vektor der Skalierungsfaktoren bzgl. der einzelnen Parameter mit \mathbf{f}_{scale} bezeichnet.

Nach der Skalierung der Parameter ergab deren Untersuchung auf Identifizierbarkeit, dass unter den oben genannten Randbedingungen alle modellierten kinematischen Parameter identifizierbar sind. Die Konditionszahl des Minimierungsproblems beträgt 51.58, was für eine nichtlineare Optimierung und die Anzahl der zu identifizierenden Parameter in einem vertretbaren Bereich liegt [17].

Zur weiteren Überprüfung der Konditionierung werden die Startwerte für die einzelnen Parameter mit Abweichungen bzgl. der simulierten Parameter versehen. Die translatorischen Parameter werden mit einem beliebigen Fehler im Bereich von $\pm 6 \text{ mm}$ belegt. Für die Rotationen wird ein maximaler Fehler von $\pm 3^\circ$ angenommen. Bei den Steifigkeiten werden Diskrepanzen von $\pm 10\%$ zugelassen.

Die entstehenden translatorischen und rotatorischen Genauigkeit f_t und f_r am Target, die mit diesen Startwerten entstehen sind Tabelle 5.1 zu entnehmen. Hierbei sind die jeweiligen Mittelwerte \bar{f} , der Minimal- und Maximalwert (f_{min}, f_{max}), sowie die Standardabweichung σ_f der entsprechenden Fehlerart aufgeführt.

Tabelle 5.1.: Pose-Genauigkeit über 400 Posen nach Wahl von Startwerten

| | f_t in [mm] | f_r in [rad] |
|------------|---------------|----------------|
| \bar{f} | 34.86 | 0.13 |
| f_{min} | 9.98 | 0.03 |
| f_{max} | 66.02 | 0.21 |
| σ_f | 12.67 | 0.05 |

Die Ergebnisse zeigen, dass über die 400 simulierten Posen nur eine schwache Pose-Genauigkeit bzgl. der Translation und der Rotation erreicht wird. Durch die Minimierung der Zielfunktion erhält man nach 8 Iterationen, die jeweils 48 Evaluationen der Zielfunktion enthalten, kann die Pose-Genauigkeit gemäß Tabelle 5.2 erreicht werden.

Tabelle 5.2.: Pose-Genauigkeit über 400 Posen nach Wahl von Startwerten

| | f_t in [μm] | f_r in [μrad] |
|------------|----------------------|------------------------|
| \bar{f} | 2.55 | 0.20 |
| f_{min} | 0.62 | 0.16 |
| f_{max} | 6.62 | 0.22 |
| σ_f | 0.95 | 0.013 |

Zu beachten gilt hierbei, dass die Einheiten in μm bzw. μrad gewählt wurden. Das Verfahren zeigt ein zügiges Konvergenzverhalten. Die Überprüfung der Abweichungen der identifizierten Parameter zu denen, die genutzt wurden, um die Simulationsdaten zu erzeugen, liegt in der gleichen Größenordnung.

5.3. Kalibration der Drehmomentensensorik

Insgesamt sollen mit dem Ansatz aus Abschnitt 4.2 zur Kalibration der Drehmomentensensorik 20 Parameter identifiziert werden. Hierunter befinden sich 12 Verstärkungsfaktoren für die Vollbrückenschaltungen der DMS. Hinzu kommen 6 Winkel- bzw. Klebefehler der Drehmomentensensoren bzgl. der Achsen 2, 3, 4 und 6, sowie die x- und y-Komponente des Schwerpunktsvektors der variierenden Massen des Kalibrationstools. Die Offsets der Drehmomentensensoren werden erst in dem dritten Schritt des Kalibrationsprozesses identifiziert.

Zur Simulation wurden je Vollbrückenschaltung 10 statische Posen vorgesehen und mit dem Posenplaner aus Abschnitt 4.2.3 generiert. Zur Erzeugung des Differenzmomentes wurden 2 verschiedene Massen mit einem konstantem Schwerpunktsvektor genutzt, um das Verhalten des Roboters bei der Einnahme der 120 statischen Kalibrationsposen in dem Simulink-Modell zu beobachten. Die gewählten Massen wurden entsprechend dem in Abschnitt 6.1 detailliert beschriebenen Kalibrationstool zu 2.92 kg und 0.3 kg gewählt. Die zu den Massen gehörenden Schwerpunktsvektoren wurden aus den CAD-Daten des Tools extrahiert. Um mit dem flexiblen Robotermodell unter Verwendung beider Massen die gleiche kartesische Pose zu erreichen wurde die Elastizitätskompensation angewendet. Die Abweichung der jeweiligen zwei Posen zueinander lag im Bereich der numerischen Genauigkeit.

Die Drehmomente, die um die Achsen der Sensorkoordinatensysteme anliegen, wurden von der inversen Dynamik bereitgestellt. Die Umrechnung der Drehmomente in skalierte Spannungswerte wurde mit den Verstärkungsfaktoren durchgeführt, die zur Zeit Verwendung finden. Als Winkel- bzw. Klebefehler bzgl. der Vollbrückenschaltungen der Gelenk 2, 3, 4 und 6 wurden entsprechend Tabelle 5.3 gewählt.

Tabelle 5.3.: Simulierte Winkelfehler bzgl. der Klebungen der DMS

| | $\Delta\phi$ in [grad] |
|---------------------|------------------------|
| $\Delta\phi_{2s}$ | 1 |
| $\Delta\phi_{3s}$ | 1 |
| $\Delta\phi_{4s,1}$ | 2 |
| $\Delta\phi_{4s,2}$ | 3 |
| $\Delta\phi_{6s,1}$ | 4 |
| $\Delta\phi_{6s,2}$ | 5 |

Bei der Untersuchung hinsichtlich der identifizierbaren Parameter zeigte sich, dass alle 20 Parameter identifiziert werden konnten. Die Konditionszahlen für die Gleichungssysteme der Minimierungsprobleme wurden mit der numerischen Jacobimatrix und der daraus resultierenden Beobachtungsmatrix \mathbf{W} durch das Verfahren aus Abschnitt 2.4 berechnet. Hierbei ergab sich für das Gleichungssystem der Kalibration des redundanten Drehmomentensensors um Achse 7 eine Konditionierungszahl von 1.46 (siehe Gleichung (4.52)). Für das zweite Gleichungssystem, das neben der Kalibration des Drehmomentensensors bzgl. Achse 6, für die Identifikation des Schwerpunktsvektors der variierenden Massen verwendet werden soll ergab sich die Konditionierungszahl zu 3.72 (siehe Gleichung (4.53)). Die etwas schlechtere Konditionierung dieses Minimierungsproblems ist auf den Einfluss des Schwerpunktsvektors bzgl. der Determinierung der Drehmomente zurückzuführen.

Die Identifikation der Parameter bzgl. des Koppelgelenks 6/7 und der Komponenten des Schwerpunktsvektors erzielte Abweichungen der Differenzenmomente im Bereich von 10^{-12} Nm. Die Verstärkungsfaktoren bzgl. des redundanten Drehmomentensensors um Achse 7 wurden entsprechend der zur Simulation genutzten identifiziert. Bei der Identifikation der Verstärkungsfaktoren bzgl. des linearisierten Minimierungsproblems zur Kalibration der beiden Vollbrückenschaltungen zur Messung des Drehmomentes um Achse 6 konnten mit einer Abweichung von maximal 0.3% identifiziert werden. Entsprechende Abweichungen konnten bei der Identifikation der Klebefehler festgestellt werden steigend mit der Größe des Fehlers. Diese Abweichungen konnten durch die Minimierung des nichtlinearen Gleichungssystems eliminiert werden. So konnten die Drehmomente für die Kalibration der übrigen Parameter mit der numerischen Genauigkeit berechnet werden.

Die Konditionierungszahl des Minimierungsproblems der zusammengefassten Gleichungssysteme zur Identifikation der Parameter für die Drehmomentensensoren von Achse 1 bis 5 ergab sich zu 2.13.

Die identifizierten Parameter der redundanten Sensoren 1 und 5, sowie diejenigen bzgl. des Koppelgelenks 2/3 erreichten zu 100% die zur Simulation genutzten Werte. Die Abweichungen hinsichtlich der identifizierten Parameter mit dem linearisierten Gleichungssystem zur Kalibration des Drehmomentensensors bzgl. Achse 4 konnten durch eine anschließende nicht-lineare Optimierung des nicht linearisierten Gleichungssystems ebenso eliminiert werden.

5.4. Identifikation der Massenparameter

Bei der Identifikation der Massenparameter sollen insgesamt 49 Parameter identifiziert werden. In den drei Robotergliedern, in denen ein Drehmomentsensor implementiert ist, ergeben sich 8 Parameter für die proximal und distal gelegenen Massen und Massenschwerpunkte. Für die Übrigen 4 Roboterglieder repräsentieren 4 Parameter die Masse m , sowie den Schwerpunkt \mathbf{s} . Desweiteren sind 9 Offsets der Vollbrückenschaltungen der Drehmomentsensoren zu identifizieren, da die Mittelwerte von den Offsets der redundanten Drehmomentsensoren für die Berechnung der Drehmomente genutzt werden (vgl. Abschnitt 4.3.1).

Zur Simulation werden 300 Posen gemäß der Posenplanung aus Abschnitt 4.2.3 generiert. Hierbei wurde keine Masse am Endeffektor vorgesehen. Für die Drehmomentsensoroffsets werden Werte zwischen -2 Nm und 2 Nm modelliert.

Bei der Untersuchung hinsichtlich der Identifizierbarkeit der Parameter, stellte sich heraus, dass die Massen m_i erwartungsgemäß nicht identifizierbar sind. Der Grund hierfür ist, dass lediglich die Drehmomente als Messwerte und somit als Informationen zur Verfügung stehen. Neben der Massen sind die z-Komponenten der Produkte aus Masse und Schwerpunkt $m_i \cdot \mathbf{s}_i$ nicht eindeutig identifizierbar, die nicht direkt distal zu einem Drehmomentsensor liegen. Diese Masse und Massenschwerpunktskomponenten, haben allerdings auch keinen Einfluss auf die Berechnung der messbaren Drehmomente gemäß Gleichung (4.65). Die Koeffizientenmatrix A_{MIRO} aus Gleichung (4.64) ist um die Spalten zu reduzieren, die den nicht identifizierbaren Parametern zugeordnet sind. Bei dem Vergleich der Berechnung der messbaren Drehmomente mit der kompletten Koeffizientenmatrix und mit der reduzierten Koeffizientenmatrix sind keine Abweichungen festzustellen.

Die Konditionszahl bei der Nutzung von 300 Kalibrationsposen ergibt sich zu 100. Bei einer Erhöhung der Anzahl der Kalibrationsposen auf 2000, ergibt sich die Konditionszahl $c = 3$.

Durch den Identifikationsschritt können die identifizierbaren Parameter mittels des reduzierte Gleichungssystems ermittelt werden. Die Größe der Parameter entspricht denjenigen, die zur Simulation genutzt wurden. Somit ergeben sich lediglich Abweichungen zwischen den simulierten Drehmomenten und den mit den identifizierten Parametern berechneten Drehmomenten im Bereich der numerischen Genauigkeit.

6. Messungen

Die oben beschriebenen Kalibrationsschritte erfordern die Aufnahme von verschiedenen Messungen mit dem Robotersystem. In diesem Kapitel werden die erforderlichen Vorbereitungen für die Messungen, sowie die korrekte Durchführung der Messungen beschrieben. Zunächst wird auf die Auslegung und Konstruktion des Kalibrations-Tools eingegangen, welches verschiedenen Anforderungen der einzelnen Kalibrationsschritte genügen muss (Abschnitt 6.1). Daraufhin wird auf die Positionierung des Roboters im Raum und das experimentelle Setup eingegangen (Abschnitt 6.2). In Abschnitt 6.3 wird die Durchführung der Messungen beschrieben.

6.1. Auslegung und Konstruktion eines multifunktionalen Kalibrationstools

Zur Kalibration der Roboterkinematik ist es nötig ein Kalibrationstarget mit mindestens 3 LEDs mit dem Krypton K600 zu vermessen. Desweiteren ist es sinnvoll verschiedene Lasten am distalen Ende des Roboters während der Vermessung der Posen aufzubringen, um die Identifizierbarkeit der Steifigkeitskoeffizienten über die effektive Anregung der Drehmomente zu steigern. Hierdurch kann ebenso die Konditionierung des nichtlinearen Minimierungsproblems verbessert werden (vgl. Abschnitt 4.1 und 5.2). Ein exzentrischer Massenschwerpunkt dient der Anregung eines Drehmomentes im statischen Lastfall um die Roboterachse 7 und ermöglicht so die Identifikation der Steifigkeiten des Gelenks 7, sowie die Identifikation der Elastizitätskoeffizienten, die aus der Verkopplung der Gelenke 6 und 7 entstehen. Bei der Konstruktion ist darauf zu achten, dass die Wahl verschiedener Massen, während des Betriebs des Roboters durchgeführt werden kann. Zudem soll sich die Transformation des Target-Koordinatensystems zum TCP $\mathbf{T}_{TCP}^{Target}$ durch die Adaptierung einer anderen Masse nicht verändern.

Für die Kalibration der roboterinternen Drehmomentensensorik ist es nach dem Ansatz aus Kapitel 4.2 erforderlich verschiedene Lasten am distalen Ende des Roboters aufzubringen, wobei der Schwerpunktsvektor der variierenden Masse konstant bleibt. Auch hier kann nur durch eine Exzentrizität des Massenschwerpunkts des Kalibrationstools bzgl. der Roboterachse 7 die Kalibration des entsprechenden Momentensensors erfolgen.

Zur Identifikation der Massenparameter spielen die oben beschriebenen Anforderungen ebenso eine Rolle. Vor allem aber ist es wichtig für die Verifikation dieses Kalibrationsschrittes, dass das Tool leicht zu fertigen ist, sodass geringe Fertigungstoleranzen einzuhalten sind. Hierdurch kann der Massenschwerpunkt mit guter Näherung aus den CAD-Daten extrahiert werden. Die genaue Kenntnis über die Masse und den Massenschwerpunkt ist nötig, um ein Vergleichsmaß für die Identifikation der distalen Last am Kalibrations zu erhalten.

Im folgenden werden die verschiedenen Anforderungspunkte zur Zusammenfassung aufgelistet:

- Kompaktes und Modulares Kalibrations-Tool
- Adaptierung verschiedener Massen im Betriebszustand des Roboters
- trotz variierender Massen konstante Transformation $\mathbf{T}_{Target}^{TCP}$
- Massenschwerpunkt $\mathbf{s}_{\Delta m}$ der variierenden Massen sollte konstant sein
- Exzentrische Lagerung der Massen zur Anregung des Drehmomentes um Achse 7
- Einfache Adaptierung einer Vorrichtung zur Anbringung von Markern des externen Messsystems
- Einfache Fertigung zur Vermeidung hoher Fertigungstoleranzen

Als Referenz zur Beschreibung der Konstruktion des Kalibrations-Tools dient die Übersichtszeichnung in Abbildung 6.1.

Die Grundlage für das Kalibrations-Tool bildet eine Montageplatte. Zur Befestigung des Kalibrations-Tools am Endeffektor des Roboters dient die Schnellwechseladapterplatte. Diese wird an der Montageplatte durch sechs M 1.6 Feingewindeschrauben fixiert. Die Schnellwechseladapterplatte ist formschlüssig zum magnetischen Schnellwechseladapter des Roboters. Die Massen wurden als zylindrische Ringe (Gewichtsringe) mit axialen Bohrungen mit Passung ausgeführt. Diese werden auf einer Gewichtswelle, deren Durchmesser ebenso mit Passung gefertigt wird, gelagert. Die Gewichtswelle wird in die Montageplatte eingeschraubt und durch eine Kontermutter fixiert. Die Kontermutter an der Gewichtswelle verhindert ein unbeabsichtigtes Lösen der Gewichtswelle durch die Umkonfiguration der Last. Die Passungen dienen der formschlüssigen Verbindung in 4 Freiheitsgraden. Durch eine weitere Mutter können die Gewichtsringe kraftschlüssig auf der Welle fixiert werden. Bei der Nutzung des Kalibrations-Tools werden immer drei Gewichtsringe verwendet. Insgesamt wurden zwölf Gewichtsringe gefertigt. Jeweils drei Gewichtsringe wurden aus einem Werkstoff hergestellt. Hierbei wurden die Werkstoffe Polyoxymethylen ($\rho_{POM} \approx 1.4 \frac{g}{cm^3}$), Aluminium ($\rho_{AlMgSiPb} \approx 2.71 \frac{g}{cm^3}$), Stahl ($\rho_{V2A} \approx 7.85 \frac{g}{cm^3}$) und Messing ($\rho_{CuZn} \approx 8.7 \frac{g}{cm^3}$) gewählt. Durch die Kombination von drei Gewichtsringen beliebigen Materials kann die Last am Endeffektor des Roboters variantenreich gewählt werden. Zur Auslegung der Massen und deren exzentrischer Lagerung dienen die auf dem Identifikationsprüfstand erreichbaren statischen Lastmomente gemäß Tabelle 3.4, sowie die maximal zulässigen Drehmomente (Tabelle 3.3) und die Nennlast des Roboters von 30 N genutzt. Der Hebelarm wurde mit 40 mm gewählt.

Zur Adaptierung der Marker bzw. LEDs, die zur Vermessung der Posen des Roboters mit dem externen Messsystem nötig sind, wird ein Rohr aus Kunststoff genutzt. Dies ist massearm und kann formschlüssig durch den Absatz auf der Montageplatte und den Passstift mit dem restlichen Kalibrations-Tool verbunden werden. Zur kraftschlüssigen Verbindung der beiden Komponenten dienen 4 M2 Feingewindeschrauben. Diese werden nicht direkt in das Kunststoffrohr geschraubt, sondern in Gewindeeinsätze, die zuvor im Rohr platziert wurden. Dadurch kann ein Abnutzen der Innengewinde im Kunststoff durch häufiges An- und Abschrauben des Rohres vermieden werden. Zur Befestigung der LEDs am Rohr des Kalibrations-Tools dienen spezielle Adapterplatten, die ebenso mit M2-Schrauben und Gewindeeinsätzen mit dem Rohr verbunden werden.

In dieser Arbeit wurden drei LEDs an der Frontseite des Kalibrations-Tools verwendet. Um in weiterführenden Arbeiten mit dem Trackingsystem durch die Verwendung weiterer Marker die Sichtbarkeit des Tools zu verbessern können leicht planare Flächen auf der Mantelfläche des Rohres am Kalibrationstool vorgesehen werden, an die wiederum die LED-Adapterplatten passen.

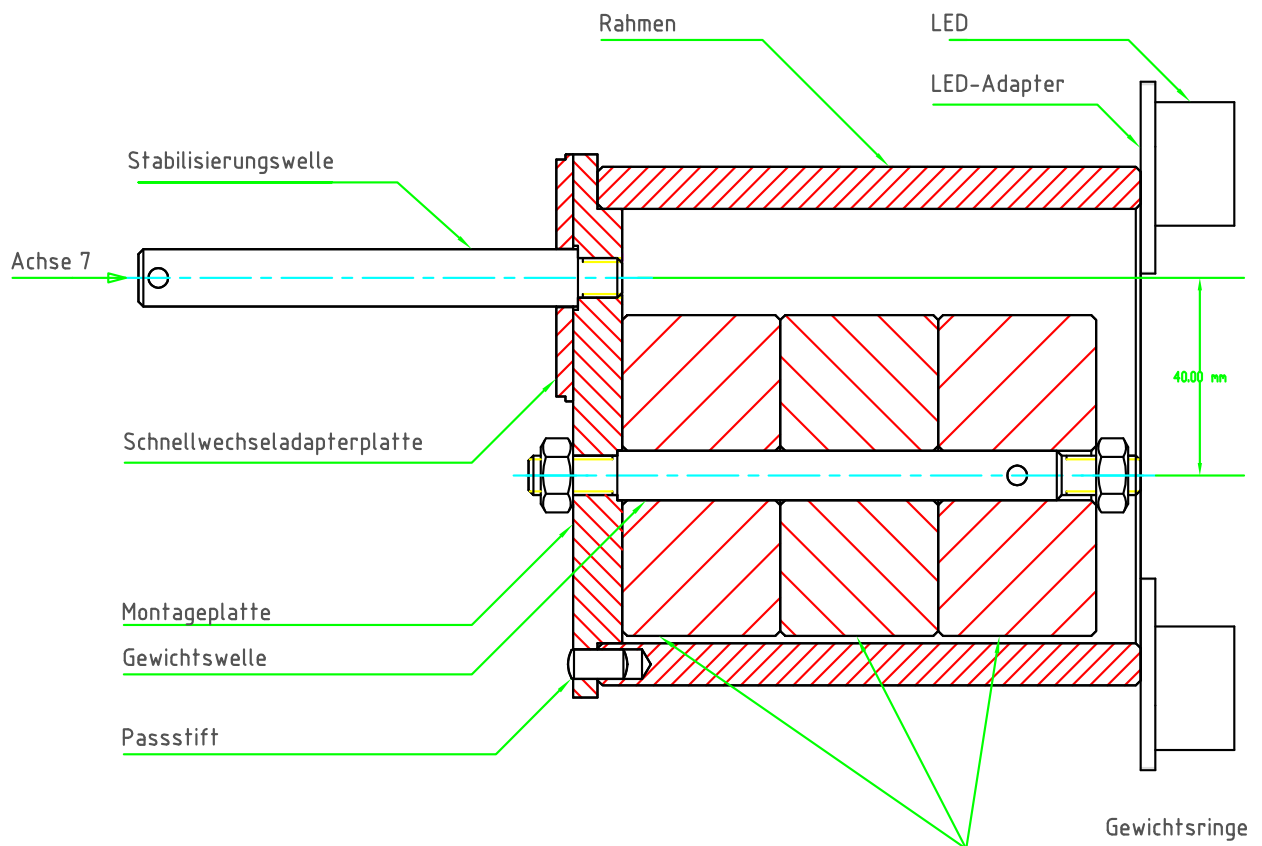


Abbildung 6.1.: Prinzipskizze des multifunktionalen Kalibrationstools

Das Kalibrations-Tool wurde in Pro/Engineer konstruiert. Abbildung 6.2 zeigt eine dreidimensionale Übersicht über das Kalibrations-Tool. Die Einzelteilzeichnungen, die zur Fertigung erstellt wurden sind dem Anhang A.3 zu entnehmen.

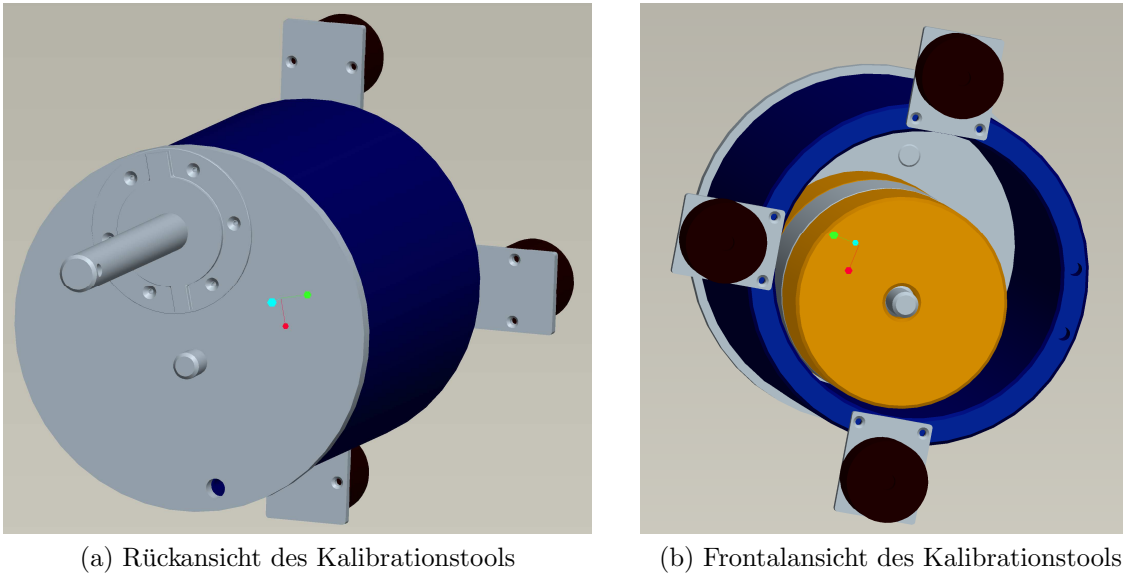


Abbildung 6.2.: Dreidimensionale CAD-Übersichtszeichnungen des multifunktionalen Kalibrationsstools

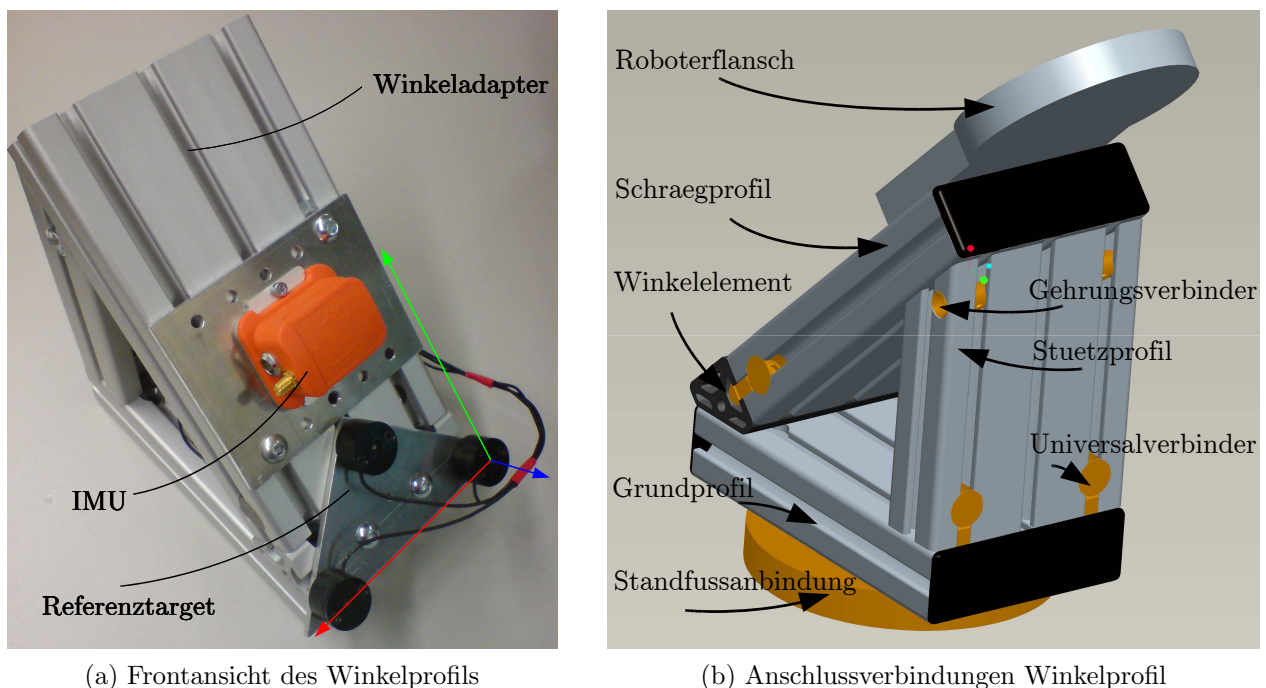
6.2. Auslegung und Konstruktion eines Winkelprofils

Zur Erzeugung eines Drehmomentes um die Roboterachse 1 im statischen Lastfall ist es nötig, dass die Achse 1 nicht parallel zur Vektor der Erdbeschleunigung verläuft. Das Drehmoment ermöglicht die Identifikation der Steifigkeit des Gelenks 1, sowie die Kalibration der beiden Vollbrückenschaltungen des entsprechenden Drehmomentsensors. Zur Positionierung des Roboters wurde ein Winkel aus Aluminiumprofilen verwendet. Neben der oben beschriebenen Anforderungen an das Winkelprofil sollte ein Trägheitssensor der Firma Xsens adaptierbar sein (vgl. Abschnitt 3.3). Die IMU dient der Aufnahme der Daten, die zur Berechnung des Gravitationsvektors bzgl. der Roboterbasis \mathbf{g}_{Base} nötig sind. Dieser ist zur Berechnung der Roboterdynamik und somit der Steuerung bzw. Regelung des Roboters erforderlich. Desweiteren soll ein Referenztarget auf dem Profil fixiert werden, was zur Vermessung der Posen $\mathbf{T}_{Target}^{Ref}$ des Targets bzgl. eines Koordinatensystems erforderlich ist, welches fest mit der Roboterbasis verbunden ist. Die Auslegung und Konstruktion dieses Winkelprofils wird in diesem Abschnitt beschrieben. Die Anforderungen werden im folgenden zusammengefasst aufgelistet:

- Steife Positionierung des Roboters auf einem speziellen Standfuss für den MIRO
- Positionierung der Roboterbasis mit einem Winkel von 45° zum Vektor der Erdbeschleunigung
- Adaptierung des Trägheitssensors
- Adaptierung eines Referenztargets des externen Messsystems

Abbildung 6.3 dient der Referenzierung der Beschreibung des Winkelprofils. Die detaillierten Zeichnungen für die Anschlussbearbeitungen sind Anhang A.4 zu entnehmen.

Ein Grundprofil dient der Befestigung des Winkelprofils auf einem Standfuss. Hierauf werden 3 Winkelemente mit einem Winkel von 45° montiert, die die Anbindung eines Schrägprofils ermöglichen. Die Befestigung erfolgt mit sogenannten Universalverbindern. Die Stabilität erhält das Winkelprofil durch ein auf Gehrung geschnittenes Stützprofil. Die Fixierung des Stützprofils auf dem Grundprofil erfolgt wiederum mit Universalverbindern, während die feste Verbindung mit dem Schrägprofil über Gehrungsverbinder erfolgt. Der Roboterflansch wird mittels Nutsteinen und dazugehörigen Schrauben mit der Fläche des Schrägprofils verbunden. Durch die hohen Flächenträgheitsmomente der Aluminiumprofile kann den Drehmomenten und den Kräften, die durch die Bewegung des Roboters entstehen, Widerstand geleistet werden, ohne dass nennenswerten Durchbiegungen resultieren.



(a) Frontansicht des Winkelprofils

(b) Anschlussverbindungen Winkelprofil

Abbildung 6.3.: Winkelprofil zur Erzeugung eines Drehmomentes um Achse 1

Die Adaptierung der IMU erfolgt mit einer Aluminiumplatte, auf deren Konstruktion nicht näher eingegangen werden soll. Um die Orientierung der IMU zur Roboterbasis messen zu können, ist die Aluminiumplatte mit Bohrungen versehen. Durch die Vermessung der Bohrungen und der Fläche der IMU-Adapterplatte und Roboterbasis mit der Space-Probe des Krypton K600, sowie der Messung des Schwerkraftvektors bzgl. der IMU, kann die beschreibende Rotationsmatrix $\mathbf{R}_{Base}^{World}$ berechnet werden. Diese wird dem Simulink-Block, der die inverse Roboterdynamik berechnet, übergeben.

Durch die Vermessung der Ebene der IMU Adapterplatte und deren Bohrungen kann die Rotationsmatrix \mathbf{R}_{IMU}^{Cam} bestimmt werden. Diese beschreibt die Orientierung des Koordinatensystems der IMU bzgl. der Kamera. Ebenso kann bei der Bestimmung der Orientierung \mathbf{R}_{Base}^{Cam} der Roboterbasis bzgl. der Kamera mit dem Roboterflansch vorgegangen werden. Von der IMU wird der Gravitationsvektor \mathbf{g}_{IMU} bzgl. des Sensoreigenen Koordinatensystems zur

Verfügung gestellt. Dieser kann mithilfe der oben beschriebenen Rotationsmatrizen bzgl. der Roboterbasis transformiert werden.

$$\mathbf{g}_{Base} = (\mathbf{R}_{IMU}^{Cam})^{-1} \mathbf{R}_{Base}^{Cam} \cdot \mathbf{g}_{IMU} \quad (6.1)$$

Der Simulink-Block der inversen Roboterdynamik, welcher für die Steuerung des Roboters verwendet wird, akzeptiert als Eingabeparameter eine Rotationsmatrix $\mathbf{R}_{Base}^{World}$, die die Orientierung der Basis bzgl. des Weltkoordinatensystems beschreibt. Die Berechnung dieser Matrix kann über folgenden mathematischen Zusammenhängen erfolgen.

$$\mathbf{R}_{Base}^{World} = [(\hat{\mathbf{g}}_{World} \times \hat{\mathbf{g}}_{Base}) \times \hat{\mathbf{g}}_{Base}, \hat{\mathbf{g}}_{World} \times \hat{\mathbf{g}}_{Base}, \hat{\mathbf{g}}_{Base}] \quad \text{mit } \hat{\mathbf{g}} = \frac{1}{\|\mathbf{g}\|_2} \cdot \mathbf{g} \quad (6.2)$$

Das Referenzkoordinatensystem wird an den Winkelementen des Winkelprofils fixiert. Die Vorgehensweise, die zur Berechnung der Transformation \mathbf{T}_{Base}^{Ref} vom Referenzkoordinatensystem zur Roboterbasis dient, wird in [19] detailliert erläutert, wie auch die Schätzung der DH-Parameter von Roboterbasis zu Gelenk 1.

6.3. Ablauf der Messungen

Die Messwertaufnahme für den entwickelten Kalibrationsprozess ist Schrittweise durchzuführen. Dabei ist zu beachten, dass die Kalibration der Drehmomentensensorik von der Kalibration der Roboterkinematik abhängt. In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise bei der Messwertaufnahme, während des Kalibrationsprozesses erläutert.

Bevor der Roboter gestartet werden kann ist es nötig die Rotationsmatrix $\mathbf{R}_{Base}^{World}$ durch die in Abschnitt 6.2 beschriebenen Messungen und Berechnungen zu bestimmen und diese dem Dynamik-Block des Simulink-Modells zu übergeben, der zur Steuerung und Regelung des Roboters benötigt wird.

Die Gelenkpotentionmeter dienen den antriebsseitigen Encodern als Absolutwertgeber bei der Initialisierung der Robotersteuerung. Der hauptsächliche Anteil der Gelenksteifigkeit liegt zwischen der Antriebsseite und den abtriebseitigen Gelenkpotentionmetern und resultiert aus den Flex-Splines der Harmonic-Drive Getriebe, sowie den Zahnriemen (vgl. Abschnitt 4.1 Abbildung 4.1). Somit ist die abtriebseitige Position abhängig von der Konfiguration des Roboters, während der Initialisierungsphase. Der Grund hierfür ist, dass die Durchbiegungen der Gelenke von den anliegenden Drehmomenten abhängen. Durch die Kalibration der Roboterkinematik werden die Gelenkoffsets Θ_i in den DH-Parametern, sowie die Gelenk-Steifigkeitsmatrix K identifiziert. Diese sind ebenso abhängig von der Initialisierungskonfiguration \mathbf{q}_{init} des Roboters. Startet man den Roboter nach der Kalibration der Roboterkinematik erneut, aber in einer stark abweichenden Initialisierungskonfiguration, als diejenige die während der Kalibration genutzt wurde, wirkt sich das negativ auf die Pose-Genauigkeit aus. Die vorläufige Lösung des Problems kann erreicht werden, indem man eine feste Initialisierungs-Konfiguration bzgl. der Gelenkpotentionmeter $\mathbf{q}_{init,poti}$ für den Roboter vorgibt. Diese sollte angefahren und ein Neustart durchgeführt werden bevor die tatsächlichen Messungen durchgeführt werden oder der Roboter für eine andere Applikation in Betrieb

genommen wird. Zur weiteren Verringerung des oben beschriebenen Einflusses der Roboterkonfiguration beim Einschalten sollte eine Gelenkanordnung gewählt werden, bei der die Drehmomente bzgl. der Gelenke möglichst gering sind. Diese Konfiguration kann über die inverse Dynamik berechnet werden.

Beim erstmaligen Einschalten des Roboters vor der Anwendung wird er mit einem Zustandsregler mit KI-Anteil auf die Initialisierungs-Konfiguration $\mathbf{q}_{poti,init}$ verfahren. Der Regler erhält als Regelgröße zunächst die auf den Abtrieb umgerechneten Gelenkwinkel der antriebsseitigen Positionssensoren \mathbf{q}_Θ . Hat der Roboter die kommandierte Position bzgl. dieser \mathbf{q}_Θ erreicht, erhält der Regler die Gelenkwinkel \mathbf{q}_{poti} gemessen durch das Gelenkpotentiometer als Regelgröße. Dadurch dass zunächst auf \mathbf{q}_Θ geregelt wird, kann der starke Einfluss des Rauschens der Gelenkpotentiometer so vermindert werden, dass die Regelabweichung nur noch wenige hundertstel Grad beträgt. Nachdem der Roboter die vorgegebene Position erreicht hat, wird er angehalten und neugestartet. Bei der Kalibration sind hierbei die Daten der Inline-Sensorik aufzuzeichnen, um den Kalibrationsprozess vollständig zu beobachten und später nachvollziehen zu können.

Daraufhin kann mit der Vermessung der Posen für die Kalibration der Roboterkinematik unter Verwendung verschiedener Massen begonnen werden. Die Auswertung der aufgenommenen Daten wird offline durchgeführt. Nach der Identifikation der kinematischen Parameter und der Steifigkeiten sollte eine Verifikation der Pose-Genauigkeit mit einigen aufgenommenen Posen durchgeführt werden. Zu beachten ist, dass diese Posen nicht Teil des Kalibrationsschrittes sind bzw. nicht im Minimierungsproblem berücksichtigt werden.

Nach diesem ersten Kalibrationsschritt kann die Planung der statischen Posen für die Kalibration der Drehmomentensensorik durchgeführt werden. Durch die Wahl verschiedener Massen, deren Parameter wie Schwerpunktsvektor und Betrag der Masse aus der Konstruktion als bekannt angenommen werden, wird die Elastizitätskompensation gemäß Abschnitt 4.2.3 durchgeführt. Hierdurch kann unter der Verwendung verschiedener Lasten eine nahezu identische kartesische Pose erreicht werden. Auch die Elastizitätskompensation ist mit wenigen Posen zu verifizieren. Hierfür ist das Kalibrationstool mit Markern vom Trackingsystem zu nutzen, wobei zum Einen eine möglichst niedrige Belastung (700 g) und zum anderen eine möglichst große Belastung (3 kg) des distalen Endes des Roboters gewählt werden sollte, um die gleichen kartesischen Posen anzufahren.

Zur Messwertaufnahme für die Drehmomentensensor-Kalibration sollte der Rahmen des Kalibrationstools abgenommen werden. Das ermöglicht die Erzeugung größerer Differenzdrehmomente $\Delta\boldsymbol{\tau}$. Direkt im Anschluss daran können die statischen Posen für die Identifikation der Massenparameter aufgenommen werden.

Nach der Messwertaufnahme erfolgen die letzten beiden Identifikationen offline. Um eine iterative Annäherung durch eine Wiederholung des Kalibrationsprozesses durchzuführen genügt es die kinematische Kalibration erneut mit Drehmomenten auszuführen, die bereits mit dem identifizierten Modell umgerechnet wurden. Sollte sich eine deutliche Veränderung der Steifigkeitsparameter und eine darauffolgende Verbesserung des Modells ergeben, ist lediglich die experimentelle Messwertaufnahme für die Kalibration der Drehmomentensensorik zu wiederholen. Hierfür sind zunächst die statischen Posen mittels der Elastizitätskompensation erneut an das Modell anzupassen.

Im folgenden werden die nötigen Schritte bei den Messungen zusammengefasst aufgelistet:

1. Vermessen der IMU bzgl. der Roboterbasis und Messen von \mathbf{g}_{IMU} zur Bestimmung von $\mathbf{R}_{Base}^{World}$
 - Übergabe von $\mathbf{R}_{Base}^{World}$ an Dynamik-Block der Robotersteuerung
2. Initialisierung des Roboters bei $\mathbf{q}_{poti,init}$
3. Vermessung der Posen zur Kalibration der Roboterkinematik unter Verwendung verschiedener Massen
 - Offline-Kalibration der Roboterkinematik
 - Verifikation mittels Pose-Genauigkeitsuntersuchungen
4. Planung der Posen für die Kalibration der Drehmomentensensorik mittels des Posenplaner
5. Wahl der zu verwendenden Massen und Berechnung der Posen bei denen die Elastizität kompensiert wird
6. Verifikation der Elastizitätskompensation mit dem Trackingsystem
7. Entfernen des Rahmens vom Kalibrationstool
8. Vermessen der Posen zur Kalibration der Drehmomentensensorik unter Verwendung der geplanten Massen
9. Vermessen der Posen zur Identifikation der Massenparameter unter Verwendung entsprechender Massen
 - Offline-Kalibration der Drehmomentensensorik
 - Offline-Identifikation der Massenparameter
 - Erneute Kalbration der Roboterkinematik mit kalibrierten Daten der Drehmomentensensorik
 - Wiederholung der Messwertaufnahme der Drehmomentensensorik mit Posen, bei denen die Elastizitäten des Roboter mit höherer Genauigkeit kompensiert werden.
10. Verifikation der Kalibrationsergebnisse (vgl. Abschnitt 7)

7. Darstellung und Analyse der Ergebnisse

In diesem Kapitel wird die Darstellung der Ergebnisse des Kalibrationsprozesses hinsichtlich der ersten beiden Schritte und dessen Analyse durchgeführt. Zur Auswertung sind für jeden Kalibrationsschritt verschiedene Methoden der Darstellung angewandt worden, die jeweils beschrieben werden. Die Abfolge der Ergebnisdarstellung und Deutung erfolgt analog zur Durchführung der Kalibrationsschritte. Zunächst wird sich der Kalibration der Roboterkinematik gewidmet, die die Grundlage für die Kalibration der Drehmomentensensorik repräsentiert (Abschnitt 7.1). Daraufhin erfolgt in Abschnitt 7.2 die Verifikation der Kalibration der Drehmomentensensorik innerhalb der Ergebnisdarstellung.

7.1. Ergebnisse der Kalibration des kinematischen Robotermodells

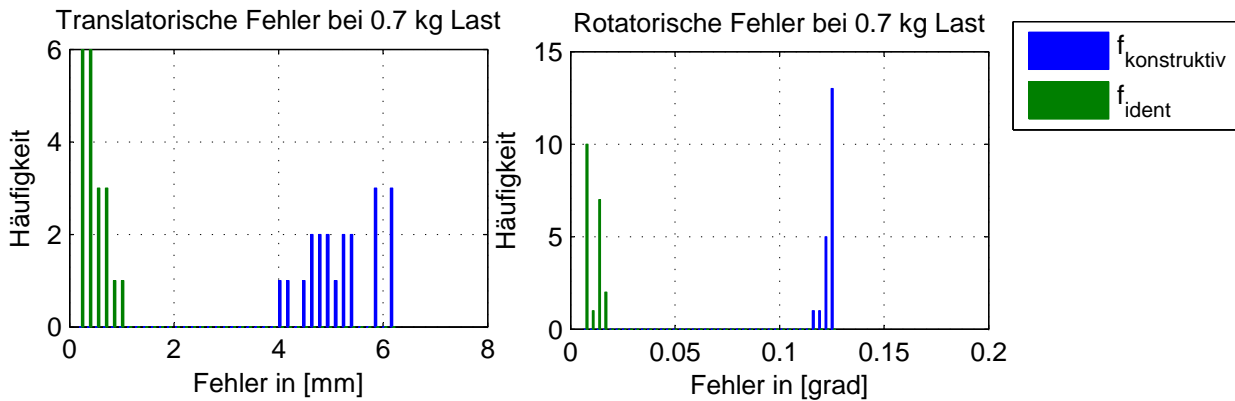
Zur Kalibration der Roboterkinematik des MIRO 003 wurden 400 verschiedene Posen des Endeffektor-Targets, welches das Kalibrations-Tool mit Rahmen bildet, mit dem externen Messsystem Krypton K600 vermessen. Die Posen wurden mittels des Posenplaners, der in Abschnitt 2.2 beschrieben wurde, generiert. Hierbei wird der gesamte Arbeitsraum unter Ausnutzung der Redundanz des Roboters mit Posen abgedeckt. Jeweils wurde nach der Messung von 100 Posen die Masse des Kalibrations-Tools verändert. Die verschiedenen Lasten wurden mit 0.7 kg, 1.1 kg, 1.8 kg und 2.6 kg gewählt.

Zur Optimierung der Roboterkinematik, bei der der Parametervektor gemäß Abschnitt 4.1 freigegeben wurde, wurden jeweils 80 Posen der 4 Sets unterschiedlichen Gewichts genutzt. Die verbleibenden 80 Posen dienen der Evaluierung des Kalibrationsergebnisses. Die 20 Evaluations-Posen je Gewicht wurden so gewählt, dass sie ausreichend über den Arbeitsraum verteilt sind.

Zum Vergleich der resultierenden Kinematik mit den kinematischen Zusammenhängen, die die bisher genutzten Parameter enthalten, wurde eine weitere Optimierung durchgeführt. Hierbei wurden lediglich die konstanten Transformationen mittels der 320 Kalibrations-Posen identifiziert. Mittels der beiden resultierenden Parametervektoren wurden die verbleibenden 80 Posen auf ihre translatorischen und rotatorischen Pose-Abweichungen f_t und f_r überprüft. Zur Darstellung dient je Lastfall ein Plot, der die Häufigkeit der Fehler, abhängig von der Größe der Fehler, beinhaltet. Die Plots dienen der Visualisierung des Bereichs in dem die Fehler, unter Verwendung der konstruktiven bzw. identifizierten Parameter, liegen. Die numerischen Werte für Mittelwert \bar{f} , Minimalwert f_{min} , Maximalwert f_{max} und Standardabweichung σ_f der translatorischen bzw. rotatorischen Fehler sind der unterstehenden Tabelle zu entnehmen.

Abbildung 7.1 enthält die Ergebnisse für die entstehenden Pose-Abweichungen bei der Verwendung einer Last von 700 g. Die angegebene Legende ist ebenso für die Histogramme in

den Abbildungen 7.2, 7.3 und 7.4 gültig.

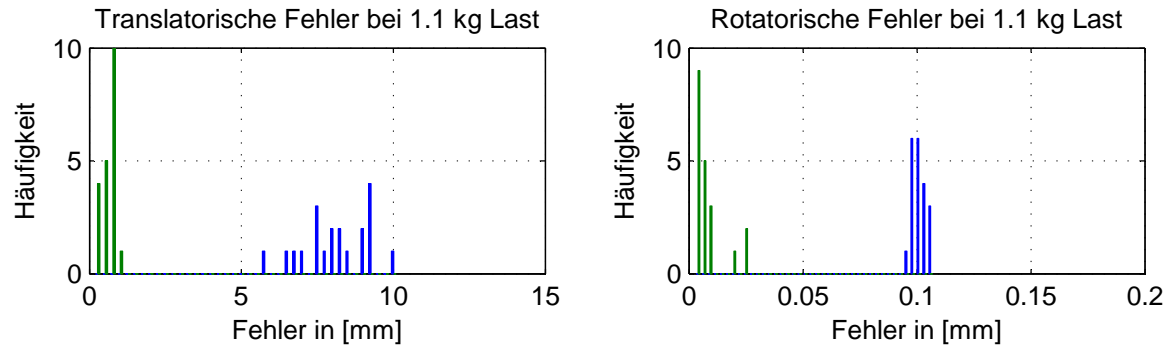


| | $f_{t,\text{konstruktiv}}$ in [mm] | $f_{t,\text{ident}}$ in [mm] | $f_{r,\text{konstruktiv}}$ in [grad] | $f_{r,\text{ident}}$ in [grad] |
|------------|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| \bar{f} | 5.22 | 0.46 | 2.99 | 0.26 |
| f_{\min} | 4.06 | 0.15 | 2.79 | 0.15 |
| f_{\max} | 6.26 | 1.00 | 3.07 | 0.39 |
| σ_f | 0.67 | 0.22 | 0.06 | 0.08 |

Abbildung 7.1.: Ergebnisse der Kalibration der Roboterkinematik bei einer Last von 0.7 kg

Das Histogramm aus Abbildung 7.1 zeigt eine starke Verringerung der translatorischen, sowie rotatorischen Pose-Abweichungen durch die Nutzung der identifizierten Parameter. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass die Mittelwerte und Maximalwerte auf 10-15 % der Werte reduziert werden, die unter Verwendung der konstruktiven Parameter resultieren. So ergibt sich für die translatorische Pose-Abweichung ein Wert von knapp 0.5 ± 0.2 mm unter Einbezug der Standardabweichung. Die Standardabweichung der rotatorischen Abweichungen steigt um ein nicht nennenswertes Maß. Die Minimalwerte werden auf weniger als 1 % mit den identifizierten Parametern reduziert.

Die Visualisierung der Pose-Abweichung bei der Nutzung einer Last von 1.1 kg wird im nachfolgenden Histogramm in Abbildung 7.2 durchgeführt. Die ebenso enthaltene Tabelle gibt die Pose-Abweichungen als Zahlenwerte an.



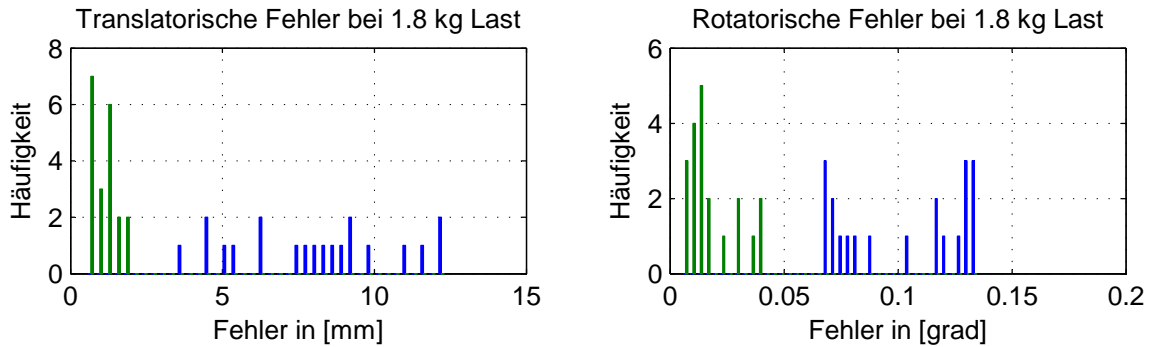
| | $f_{t,konstruktiv}$ in [mm] | $f_{t,ident}$ in [mm] | $f_{r,konstruktiv}$ in [grad] | $f_{r,ident}$ in [grad] |
|------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------|
| \bar{f} | 8.14 | 0.63 | 2.44 | 0.21 |
| f_{min} | 5.68 | 0.15 | 2.33 | 0.07 |
| f_{max} | 10.13 | 1.05 | 2.59 | 0.61 |
| σ_f | 1.12 | 0.24 | 0.08 | 0.16 |

Abbildung 7.2.: Ergebnisse der Kalibration der Roboterkinematik bei einer Last von 1.1 kg

Im Histogramm aus Abbildung 7.2 ist eine deutliche Zunahme der translatorischen Abweichungen bzgl. der konstruktiven Parameter zu erkennen. Auffällig hierbei ist, dass die rotatorischen Abweichungen des bisherigen kinematischen Modells nahezu gleich bleiben bzw. leicht abnehmen. Die translatorischen Abweichungen des identifizierten Modells der Kinematik variieren bis auf die durchschnittliche Abweichung \bar{f} kaum gegenüber derjenigen, die unter Verwendung einer geringeren Last entstehen. Die mittlere translatorische Poseabweichung beträgt hier etwa 0.6 ± 0.25 mm. Mit dem neuen Modell ergeben sich leichte Verbesserungen des Mittelwertes der rotatorischen Pose-Abweichung, während das Maximum und die Standardabweichung um etwa 60-100 % zunehmen.

Eine weitere Steigerung der Last auf 1.8 kg bewirkt eine Zunahme der translatorischen Pose-Abweichung unter Verwendung der konstruktiven Parameter bzgl. des Maximalwertes und der Standardabweichung (Abbildung 7.3). Insbesondere nimmt die Standardabweichung $\sigma_{f_{t,konstruktiv}}$ um 100 % zu. Somit beträgt die die mittlere translatorische Pose-Abweichung für das alte kinematische Modell 8 ± 2.7 mm. Bei dem identifizierten Parametersatz kann eine Steigerung der mittleren und minimalen translatorischen Pose-Abweichung von 0.3 mm bzw. 30 % beobachtet werden. Desweiteren findet eine Zunahme der übrigen evaluierten Werte ($f_{t,max,ident}$, $\sigma_{f_{t,ident}}$) um 100 % statt, sodass die mittlere Pose-Genauigkeit 1 mm mit 1 ± 0.4 mm überschreitet.

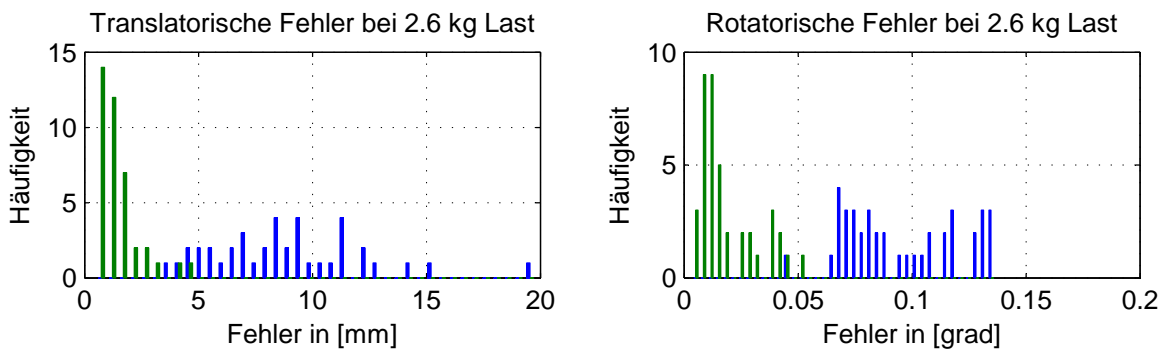
Die rotatorische Standardabweichung bzgl. der Pose-Fehler und dem konstruktiven Modell steigt um 600 % an, was den wesentlichen Unterschied gegenüber der Verwendung eines kleineren Gewichts ausmacht. Auch bzgl. des identifizierten Modells können Einbußen in allen evaluierten Größen außer dem Maximalwert im Bereich von etwa 100 % verzeichnet werden.



| | $f_{t,konstruktiv}$ in [mm] | $f_{t,ident}$ in [mm] | $f_{r,konstruktiv}$ in [grad] | $f_{r,ident}$ in [grad] |
|------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------|
| \bar{f} | 8.01 | 1.06 | 2.47 | 0.44 |
| f_{min} | 3.60 | 0.52 | 1.62 | 0.13 |
| f_{max} | 12.35 | 1.99 | 3.26 | 0.99 |
| σ_f | 2.63 | 0.44 | 0.66 | 0.28 |

Abbildung 7.3.: Ergebnisse der Kalibration der Roboterkinematik bei einer Last von 1.8 kg

Die Ergebnisse bzgl. der Verwendung einer Endeffektorbelastung mit einer Masse von 2.6 kg werden in Abbildung 7.4 dargestellt.



| | $f_{t,konstruktiv}$ in [mm] | $f_{t,ident}$ in [mm] | $f_{r,konstruktiv}$ in [grad] | $f_{r,ident}$ in [grad] |
|------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------|
| \bar{f} | 8.83 | 1.47 | 2.31 | 0.46 |
| f_{min} | 3.60 | 0.50 | 1.08 | 0.09 |
| f_{max} | 19.78 | 4.53 | 3.29 | 1.27 |
| σ_f | 3.31 | 0.95 | 0.61 | 0.32 |

Abbildung 7.4.: Ergebnisse der Kalibration der Roboterkinematik bei einer Last von 2.6 kg

Die Begutachtung des Histogramms bzgl. der translatorischen Pose-Abweichungen zeigt eine leichte Steigerung der Standardabweichung bzgl. des konstruktiven Parametersatzes, was durch die Tabelle bestätigt wird. Desweiteren ist der Maximalwert sehr hoch mit knapp 20 mm. Die rotatorischen Abweichungen bzgl. beider Modelle variieren kaum gegenüber der geringeren Belastung des Roboters.

Die mittlere translatorische Abweichung steigt auf den schwächsten Wert mit 1.5 ± 1 mm, was einer Steigerung um 50 % des Mittelwertes und 100 % der Standardabweichung entspricht. Der Maximalwert steigt leicht um 2.5 mm an.

Insgesamt konnte durch eine erste Kalibration der Roboterkinematik des MIRO mit dem in Abschnitt 4.1 beschriebenen Verfahren eine deutliche Verbesserung der Pose-Abweichungen erreicht werden. Der Vergleich der Pose-Abweichungen des bisherigen mit dem neu identifizierten Modells unter der Verwendung einer Last von 1.1 kg zeigt eine Reduzierung auf weniger als 10 % bzgl. beider Pose-Abweichungen. Auch beim Einsatz des MIRO in der minimal-invasiven Chirurgie sollte sich diese Genauigkeitssteigerung äußern. Bei Verwendung der MICA (850 g), der neuesten Generation eines minimal-invasiven Instrumentes des DLR, ist somit ein maximaler Translationsfehler von 1.8 mm zu erwarten, bei einer Werkzeuglänge von 200 mm. Dieser Wert errechnet sich aus dem translatorischen und rotatorischen Mittelwert sowie der Standardabweichungen.

Dennoch gibt es verbleibende Modellfehler. Auffällig ist die sprungartige Erhöhung der translatorischen Pose-Abweichung bei der Erhöhung der Endeffektorlast von 0.7 kg auf 1.1 kg bei einer sich kaum verändernden rotatorischen Pose-Abweichung bzgl. des konstruktiven Parametersatzes.

Bei einer weiteren Erhöhung der Last überschreitet das identifizierte Modell deutlich die 1 mm Marke. Auch das konstruktive Modell wird deutlich schwächer (Steigerung σ_t von 600 %). Die nochmalige Erhöhung der Last hat unerwartet weniger Einfluss, gerade auf die rotatorischen Pose-Abweichungen. Aufgrund der hohen translatorischen Genauigkeit bzgl. der Verwendung der geringen Massen sind die Mängel in den Steifigkeiten zu suchen. Die erste Annahme ist, dass die unzulänglich gemessenen Drehmomente starken Einfluss haben. Gerade die Verstärkungen der Vollbrückenschaltungen könnten einer der Gründe für die abnehmende Pose-Genauigkeit sein. Eine weitere Hypothese ist, dass die Abhängigkeit der Durchbiegung der Gelenke $\Delta \mathbf{q}_i(\boldsymbol{\tau})$ von den Drehmomenten nicht korrekt modelliert wurde. Die Ursache für die niedrigen Steifigkeiten der Gelenke des MIRO sind die Flex-Splines der Harmonic-Drive Getriebe, wie auch die Zahnriemen zur Übertragung des Antriebsmoments auf den Abtrieb. Die Materialien dieser Komponenten sind Polymere, deren Materialverhalten nur näherungsweise als linear und isotrop-elastisch beschrieben werden kann, und als viskoelastisch dokumentiert sind. Dadurch dass bei Erhöhung der Last auf den höchsten Wert dieser Messungen kaum Veränderungen in der rotatorischen Abweichung zu erkennen sind, lässt sich ein degressiver Verlauf der Funktion $\Delta \mathbf{q}_i(\boldsymbol{\tau})$ erahnen.

7.2. Ergebnisse der Kalibration der roboterinternen Momentensensorik

Nach der kinematischen Kalibration ist eine genauere Kenntnis über die Gelenksteifigkeiten vorhanden. Zur Anfahrt einer kartesischen Pose mit verschiedenen Gewichten, ist die in Abschnitt 4.2.3 vorgestellte Elastizitätskompensation für die geplanten Posen durchzuführen. So kann die kartesische Pose mit erhöhter Genauigkeit erreicht werden. Die Planung der 120 Kalibrations-Posen, die je Masse genutzt wurden, um die Daten der Inline-Sensorik des Roboters zu erhalten, erfolgt wiederum mit dem Posenplaner aus Abschnitt 4.2.3.

Zur Verifikation der Elastizitätskompensation wurden 22 Posen unter Verwendung des Kalibrations-Tools mit Rahmen und zwei Massen zu 0.7 kg und 2.6 kg mit dem Krypton K600 vermessen. Die Bestimmung des Abstandes zweier ähnlicher Posen, mit den verschiedenen Endeffektorlasten angefahren wurden, und die Mittelwertbildung über die 22 translatorischen Differenzen, ergab eine mittlere translatorische Abweichung von 0.55 mm.

Für die Belastung des Roboters wurde das Kalibrations-Tool ohne das Kunststoffrohr verwendet, um ein höheres Differenzenmoment zu erzeugen. Es wurden im weiteren drei verschiedene Massen zu 0.25 kg, 1.4 kg und 2.2 kg zur Aufnahme der Messwerte verwendet.

Als Ergebnisse der Kalibration der Drehmomentsensorik ohne die Berücksichtigung des Einflusses der Sensoroffsets, die im folgenden präsentiert werden, dient zum Einen je Drehmomentsensortyp ein Plot, der die Annäherung der alten Sensorparameter und der neu identifizierten an die durch Gleichung (4.34) berechneten Differenzenmomente $\Delta\tau$ darstellt. Zum Anderen werden in Tabellen die Abweichungen von den berechneten Differenzenmomenten mit Mittelwert \bar{f} , Minimalwert f_{min} , Maximalwert f_{max} und Standardabweichung σ_f angegeben.

Zur Darstellung der Ergebnisse der redundanten Drehmomentsensoren 1, 5 und 7 soll repräsentativ Abbildung 7.7 dienen. Diese zeigt die Annäherung der beiden kalibrierten Sensormodelle an die berechneten Differenzenmomente bzgl. der Vollbrückenschaltungen des Gelenks 1. Auffällig bei der Betrachtung ist, dass die beiden Sensormodelle nahezu deckungsgleich sind und gewisse Abweichungen zu den berechneten Differenzenmomenten bestehen.

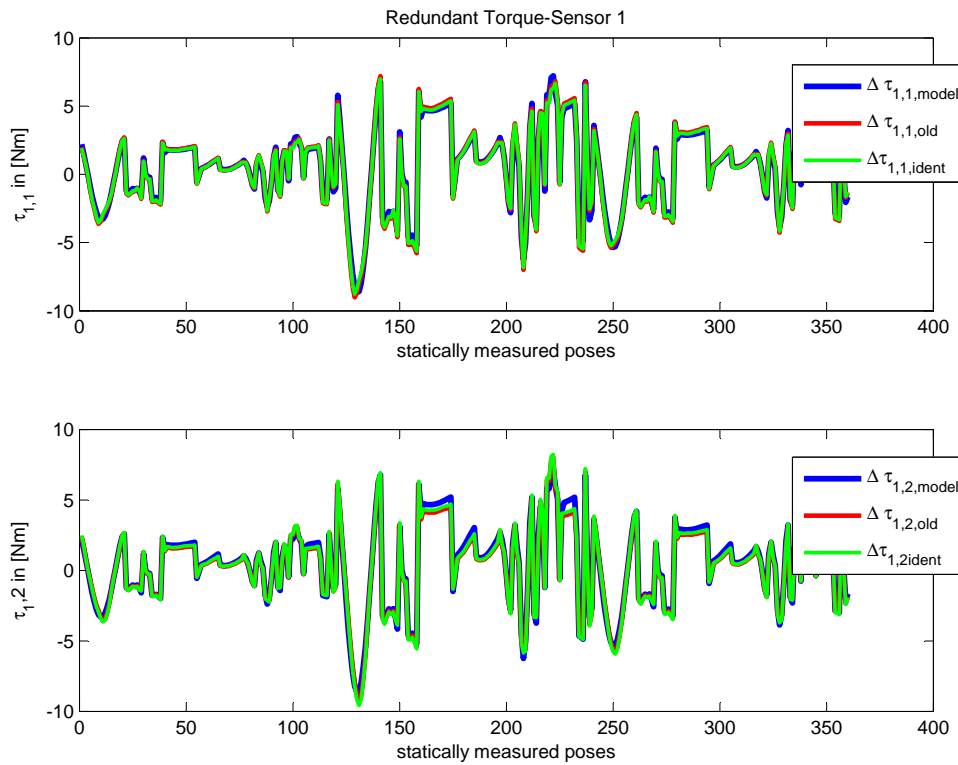


Abbildung 7.5.: Annäherung der Sensorwerte von dem redundanten Drehmomentsensor 1 an die berechneten Differenzmomente

Dieser Eindruck wird durch die statistischen Werte für die Abweichungen hinterlegt (siehe Tabelle 7.1). Die mittlere Abweichungen beider Sensormodelle des redundanten Drehmomentsensors 1 liegen bei etwa 0.2 ± 0.26 Nm für die erste Vollbrückenschaltung und 0.12 ± 0.3 Nm für die zweite Vollbrückenschaltung. Die Abweichungen zwischen den beiden Sensormodellen liegen im hundertstel Nm-Bereich. Ähnliche Ergebnisse liefert die Auswertung der Kalibration des redundanten Drehmomentsensors bzgl. des Robotergelenks 5.

Tabelle 7.1.: Abweichungen der Differenzmomente bzgl. dem redundanten Drehmomentsensor von Gelenk 1 von den berechneten hinsichtlich der alten und neu identifizierten Sensorverstärkungen

| | 1. Vollbrückenschaltung | | 2. Vollbrückenschaltung | |
|------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| | $f_{\tau_{alt,1,1}}$ in [Nm] | $f_{\tau_{ident,1,1}}$ in [Nm] | $f_{\tau_{alt,1,2}}$ in [Nm] | $f_{\tau_{ident,1,2}}$ in [Nm] |
| \bar{f} | -0.0113 | -0.0264 | -0.1315 | -0.1115 |
| f_{min} | -0.9665 | -0.9168 | -1.0188 | -1.1738 |
| f_{max} | 0.8621 | 0.8700 | 0.8199 | 1.0282 |
| σ_f | 0.2778 | 0.2623 | 0.2991 | 0.2905 |

Tabelle 7.2.: Abweichungen der Differenzenmomente bzgl. dem redundanten Drehmomentsensor von Gelenk 5 von den berechneten hinsichtlich der alten und neu identifizierten Sensorverstärkungen

| | 1. Vollbrückenschaltung | | 2. Vollbrückenschaltung | |
|------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| | $f_{\tau_{alt,5,1}}$ in [Nm] | $f_{\tau_{ident,5,1}}$ in [Nm] | $f_{\tau_{alt,5,2}}$ in [Nm] | $f_{\tau_{ident,5,2}}$ in [Nm] |
| \bar{f} | -0.0525 | -0.0676 | 0.0223 | 0.0224 |
| f_{min} | -1.1317 | -0.8884 | -0.2291 | -0.2293 |
| f_{max} | 0.3248 | 0.2970 | 0.7014 | 0.7019 |
| σ_f | 0.2805 | 0.2172 | 0.1775 | 0.1775 |

Für den redundanten Drehmomentsensor bzgl. der Roboterachse 7 fallen die Ergebnisse für die beiden Sensormodelle ebenso ähnlich aus. Allerdings liegt die Abweichung unterhalb des tausendstel Nm-Bereiches abgesehen von den Maximalwerten, die sich bei etwa einem tausendstel Nm befinden.

Tabelle 7.3.: Abweichungen der Differenzenmomente bzgl. dem redundanten Drehmomentsensor von Gelenk 7 von den berechneten hinsichtlich der alten und neu identifizierten Sensorverstärkungen

| | 1. Vollbrückenschaltung | | 2. Vollbrückenschaltung | |
|------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| | $f_{\tau_{alt,7,1}}$ in [Nm] | $f_{\tau_{ident,7,1}}$ in [Nm] | $f_{\tau_{alt,7,2}}$ in [Nm] | $f_{\tau_{ident,7,2}}$ in [Nm] |
| \bar{f} | 0.0003 | 0.0003 | -0.0002 | -0.0002 |
| f_{min} | -0.0005 | -0.0005 | -0.0088 | -0.0007 |
| f_{max} | 0.0013 | 0.0011 | 0.0083 | 0.0002 |
| σ_f | 0.0004 | 0.0002 | 0.0037 | 0.0002 |

Zum weiteren Vergleich der beiden Sensormodelle soll Tabelle 7.4 dienen, die die jeweiligen Sensorverstärkungen gegenüberstellt und gleichzeitig deren prozentuale Abweichungen voneinander angibt. Die Abweichungen der Sensorverstärkungen liegen zwischen 0 % und 7 % außer bei der ersten Vollbrückenschaltung des Drehmomentsensors bzgl. der Achse 5. Hier ist eine starke Abweichung von 30 % vorhanden. Die Ergebnisse aus Tabelle 7.2 zeigen ebenso leichte Abweichungen der beiden Verstärkungsfaktoren hinsichtlich ihrer Annäherung an die berechneten Drehmomente. Das, mit dem hier entwickelten Verfahren kalibrierte, Sensormodell ist abgesehen von der mittleren Abweichung im hundertstel Nm-Bereich besser, als das ursprüngliche Sensormodell.

Tabelle 7.4.: Gegenüberstellung der bisherigen und der neu identifizierten Sensorverstärkungen und deren prozentuale Abweichung

| | k_{alt} | k_{ident} | Δk in [%] |
|-----------|-----------|-------------|-------------------|
| $k_{1,1}$ | 797.73 | 822.25 | 2.98 |
| $k_{1,2}$ | 844.53 | 817.00 | 3.37 |
| $k_{5,1}$ | -187.47 | -145.07 | 29.22 |
| $k_{5,2}$ | -198.81 | -198.95 | 0.07 |
| $k_{7,1}$ | -67.74 | -63.36 | 6.91 |
| $k_{7,2}$ | -69.33 | -72.48 | 4.34 |

Bei der Betrachtung der Annäherung der gemessenen Drehmomente, die mit den Verstärkungsfaktoren und Winkelfehlern in Nm umgerechnet werden, an die berechneten Differenzdrehmomente, wird bzgl. der Achse 2 der Eindruck einer Abnahme der Abweichungen vermittelt (siehe Abbildung 7.7). Auch bzgl. der Achse 3 ist zu erkennen, dass sich das neue Sensormodell der Realität annähert.

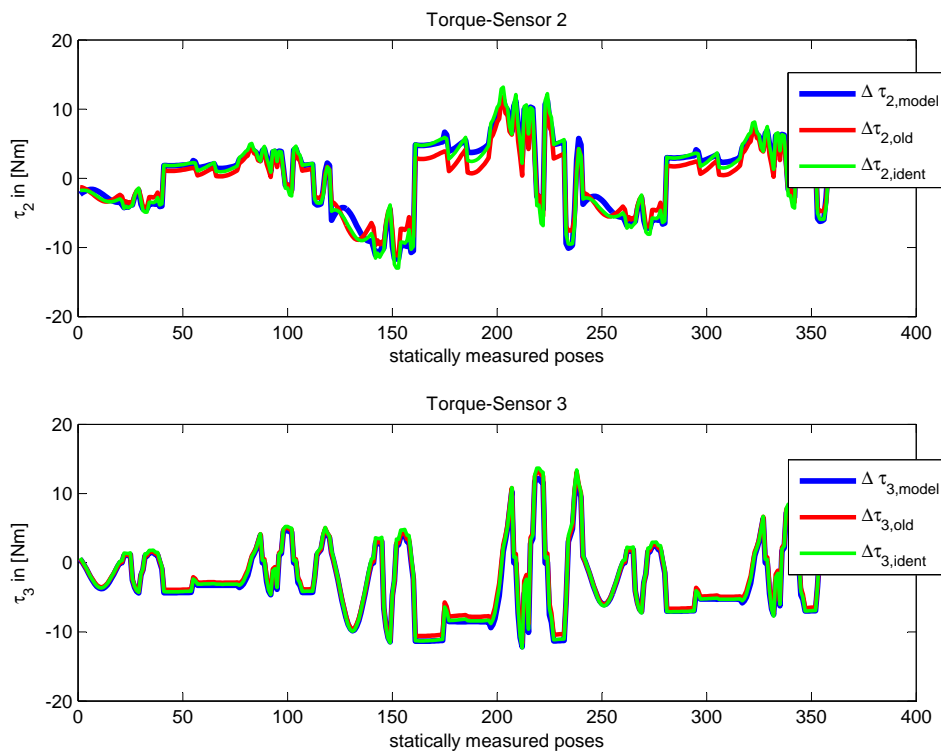


Abbildung 7.6.: Annäherung der Sensorwerte von den Drehmomentsensoren 2 und 3 an die berechneten Differenzenmomente

Der in Abbildung 7.7 gewonnene Eindruck wird durch die statistischen Werte in Tabelle 7.5 bestätigt. Die numerischen Werte für die Drehmoment-Abweichungen können um 30%

bis 70 % reduziert werden. So ergibt sich die verbleibende mittlere Abweichung mit dem neuen Sensormodell zu $0.14 \pm 0.7 \text{ Nm}$. Auch bzgl. des identifizierten Sensormodells für die Vollbrückenschaltung des Drehmomentsensors für Achse 3 kann eine leichte Abnahme der Abweichungen festgestellt werden. Allerdings liegen diese lediglich im hundertstel Nm-Bereich.

Tabelle 7.5.: Abweichungen der Differenzenmomente bzgl. der Drehmomentsensoren von Gelenk 2 und 3 von den berechneten hinsichtlich der alten und neu identifizierten Sensorverstärkungen

| | Drehmomentsensor 2 | | Drehmomentsensor 3 | |
|------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| | $f_{\tau_{alt,2}}$ in [Nm] | $f_{\tau_{ident,2}}$ in [Nm] | $f_{\tau_{alt,3}}$ in [Nm] | $f_{\tau_{ident,3}}$ in [Nm] |
| \bar{f} | -0.5428 | -0.1386 | 0.4574 | 0.3037 |
| f_{min} | -3.0245 | -2.4050 | -0.1315 | -0.2269 |
| f_{max} | 3.1453 | 1.7389 | 1.8365 | 1.5260 |
| σ_f | 1.2390 | 0.6934 | 0.3597 | 0.3205 |

Die prozentualen Abweichungen der Verstärkungsfaktoren der beiden Sensormodelle liegen bei 15 % für den Drehmomentsensor der Achse 2 und bei 3.5 % bzgl. der Roboterachse 3. Die identifizierten Winkelfehler für das neue Sensormodell liegen bei 2.4° bzw. 5.3° hinsichtlich der beiden Achsen 2 bzw. 3.

Tabelle 7.6.: Gegenüberstellung der bisherigen und der neu identifizierten Sensorverstärkungen bzgl. der Drehmomentsensoren 2 und 3 und deren prozentuale Abweichung, sowie identifizierte Winkelfehler

| | k_{alt} | k_{ident} | Δk in [%] |
|----------------|-----------|--------------|-------------------|
| k_2 | -547.76 | -475.06 | 15.30 |
| $\Delta\phi_2$ | - | 2.38° | - |
| k_3 | -736.74 | -711.65 | 3.52 |
| $\Delta\phi_2$ | - | 5.34° | - |

Bei den Drehmomentsensoren bzgl. der Achsen 4 kann gemäß Abbildung 7.7 und Tabelle 7.7 eine deutliche Reduzierung der statistischen Abweichung von den berechneten Differenzenmomenten mit dem neuen Sensormodell erreicht werden. Die Steigerung der Genauigkeit beträgt für die maximale Abweichung 100 % und für die Standardabweichung 150 %. Hierdurch ergibt sich die durchschnittliche Ungenauigkeit des Drehmomentsensors zu $-0.05 \pm 0.12 \text{ Nm}$. In Abbildung 7.7 ist die Annäherung an die Realität besonders gut dort zu erkennen, wo das Differenzenmoment nahezu konstant bleibt. Hier werden Rotationen um die Roboterachse 5 ausgeführt die durch die Konfiguration der übrigen Gelenkwinkel keinen Einfluss auf das Differenzendrehmoment der Achse 4 haben. Die prozentualen Abweichungen der Verstärkungsfaktoren der beiden Vollbrückenschaltungen des Drehmomentsensors bzgl. Achse 4 betragen

20 % bzw. 10 %. Auffällig ist auch der Winkelfehler, der bei der ersten Vollbrückenschaltung resultiert (vgl. Tabelle 7.8).

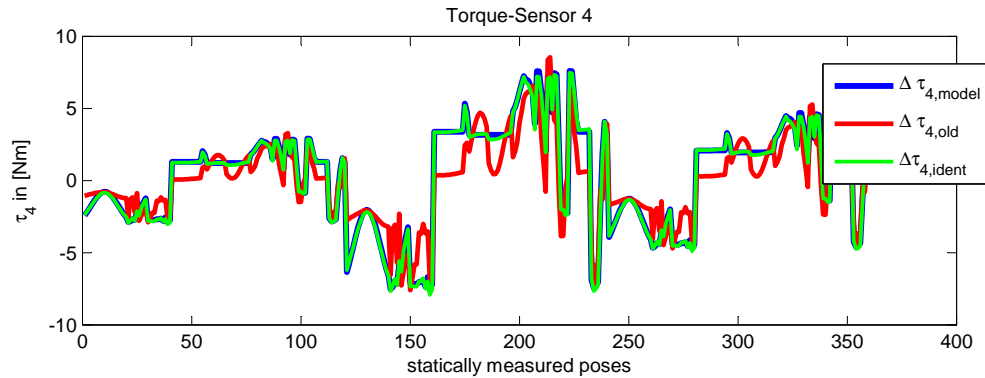


Abbildung 7.7.: Annäherung der Sensorwerte von dem Drehmomentsensor 4 an die berechneten Differenzmomente

Auch bzgl. des Drehmomentsensors sind leichte Steigerungen der Genauigkeit der Detektion des Differenzdrehmomentes zu erkennen (vgl. Tabelle 7.7). Hier kann somit eine mittlere Abweichung von $-0.0035 \pm 0.027 \text{ Nm}$ erreicht werden.

Tabelle 7.7.: Abweichungen der Differenzmomente bzgl. der Drehmomentsensoren von Gelenk 4 und 6 von den berechneten hinsichtlich der alten und neu identifizierten Sensorverstärkungen

| | Drehmomentsensor 4 | | Drehmomentsensor 6 | |
|------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| | $f_{\tau_{alt,4}}$ in [Nm] | $f_{\tau_{ident,4}}$ in [Nm] | $f_{\tau_{alt,6}}$ in [Nm] | $f_{\tau_{ident,6}}$ in [Nm] |
| \bar{f} | -0.2990 | -0.0502 | 0.0010 | -0.0035 |
| f_{min} | -3.4431 | -0.4378 | -0.1320 | -0.0959 |
| f_{max} | 4.0148 | 0.4891 | 0.1162 | 0.0543 |
| σ_f | 1.5605 | 0.1157 | 0.0399 | 0.0267 |

Die Abweichungen der Verstärkungsfaktoren der zwei Sensormodelle sind kaum erwähnenswert. Der identifizierte Winkelfehler im neu identifizierten Sensormodell liegt jedoch bei -3° .

Tabelle 7.8.: Gegenüberstellung der bisherigen und der neu identifizierten Sensorverstärkungen bzgl. der Drehmomentsensoren 4 und 6 und deren prozentuale Abweichung, sowie identifizierte Winkelfehler

| | k_{alt} | k_{ident} | Δk in [%] |
|--------------------|-----------|-------------|-------------------|
| $k_{4,1}$ | -475.47 | -399.34 | 19.06 |
| $\Delta\phi_{4,1}$ | - | -5.25° | - |
| $k_{4,2}$ | -612.92 | -560.18 | 9.42 |
| $\Delta\phi_{4,2}$ | - | 0.32° | - |
| $k_{6,1}$ | -82.85 | -83.45 | 0.72 |
| $\Delta\phi_{6,1}$ | - | -0.25° | - |
| $k_{6,2}$ | -86.44 | -83.29 | 3.78 |
| $\Delta\phi_{6,2}$ | - | -2.76° | - |

8. Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick über die weitere Vorgehensweise hinsichtlich der Modellierung und Kalibration des medizinischen Leichtbauroboters MIRO gegeben.

8.1. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Kalibrationsprozess für den medizinischen Leichtbauroboter MIRO entwickelt. Der erste Kalibrationsschritt beinhaltet die Identifikation der kinematischen Zusammenhänge unter Einbezug der im System enthaltenen Elastizitäten. Der darauf aufbauende Ansatz zur Kalibration der roboterinternen Drehmomentensensorik ermöglicht die Ermittlung der Modellparameter der Sensoren am zusammengebautem Robotersystem. Desweiteren wird bzgl. des dritten Kalibrationsschrittes, der Identifikation der Massen und Massenschwerpunkte der einzelnen Roboterglieder, ein Verfahren für den MIRO vorgestellt.

Die Kalibration der Roboterkinematik basiert auf der sechsdimensionalen Lagemessung von statischen Posen im Arbeitsraum des Manipulators. Hierfür wird ein externes Trackingsystem mit einer volumetrischen Genauigkeit von 0.1 mm genutzt. Durch die Verwendung eines Endeffektortargets und eines Referenztargets, welches fest mit der Roboterbasis verbunden ist, kann die kinematische Kette über die Direkte Kinematik geschlossen werden. Der große Einfluss der Elastizitäten hinsichtlich der Positioniergenauigkeit des MIRO erfordert die Herleitung einer erweiterten Direkten Kinematik. Durch die roboterinterne Drehmomentensensorik ist es möglich die Drehmomente um die einzelnen Gelenke zu messen. Diese werden in der Direkten Kinematik genutzt, um die Gelenkelastizitäten und die daraus resultierenden Abweichungen der abtriebsseitigen Gelenkpositionen, über die Nachgiebigkeitsmatrix, mit einzubeziehen. Zudem werden die Drehmomente um die Achsen gemessen, die jeweils orthogonal zu den Achsen der Koppelgelenke 4/5 und 6/7 liegen. Aufgrund der Lagerung des Gelenks bzgl. des Drehmomentes um diese Achse ist hier keine Durchbiegung infolge einer Gelenkelastizität zu erwarten. Durch die Lage der Drehmomentensensoren mit Versatz vom Gelenk kann die Elastizität des Sensorkörpers Auswirkungen auf die Durchbiegung bzgl. dieser Achse und somit auf die Pose-Genauigkeit des Roboters haben. Auch diese Strukturelastizitäten werden in der Modellierung der Kinematik berücksichtigt.

Zur Minimierung des Pose-Fehlers und der Identifikation der konstanten Transformationen, der DH-Parameter und der modellierten Elastizitäten wird eine Zielfunktion hergeleitet. Diese kann durch nichtlineare Optimierungsverfahren gelöst werden. Hierbei sind Startwerte für die einzelnen Parameter zu übergeben. Die Startwerte für die konstanten Transformationen werden durch ein bereits bestehendes Kalibrationsverfahren am DLR, der Kreisbogenanalyse, berechnet. Die Startwerte für die DH-Parameter können den CAD-Daten des Roboters entnommen werden. Die Gelenkelastizitäten wurden bereits vor der Montage des Roboters

auf einem speziellem Gelenkidentifikationsprüfstand durch Schwingungsanalysen identifiziert. Die hier gewonnenen Werte dienen als Startwerte für die Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix. Zur Determinierung von Startwerten für die Elastizitäten der Sensorkörper wird die Methode der Finiten Elemente genutzt.

Durch die Kalibration der Roboterkinematik können deutliche Steigerungen hinsichtlich der Pose-Genauigkeit des medizinischen Leichtbauroboters MIRO erzielt werden. Für eine Belastung des Endeffektors mit Massen zwischen 0.7 kg und 1.1 kg kann eine maximale translatorische Pose-Abweichung von etwa 1 mm eingehalten werden. Bei Verwendung einer Last von 0.7 kg wird für die mittlere translatorische Pose-Abweichung ein Wert von 0.5 ± 0.2 mm erreicht. Bei der weiteren Erhöhung der Last wird der Einfluss der Genauigkeit der gemessenen Drehmomente bzgl. der Identifikation der Elastizitäten deutlich. Hierbei steigen die mittleren Pose-Abweichungen bzgl. der Rotation und Translation um etwa 50 % an. Die Drehmomentensensoren werden bisher, wie die Gelenkelastizitäten, vor der Montage des Roboters kalibriert. Der Zusammenbau des Roboters kann in den Sensorkörpern permanente Dehnungen hervorrufen, die zu einer fehlerbehafteten Messung der Drehmomente führen können.

Zur Kalibration der roboterinternen Drehmomentensensorik wird ein Ansatz genutzt, der auf der genauen Beschreibung der Roboterkinematik basiert. Unter Ausnutzung verschiedener Massen werden statische Posen mit der gleichen abtriebsseitigen Gelenkkonfiguration angefahren. Hierbei werden die Daten der Positionsensorik und der Drehmomentensensorik aufgezeichnet. Durch die Bildung der Differenz der Drehmomente, die bei Einnahme einer gleichen Pose gemessen werden, kann der Einfluss der Masseneigenschaften des Roboters vernachlässigt werden. Die Massenparameter werden zur Zeit aus den Konstruktionsdaten des Roboters extrahiert und können Abweichungen zu den realen Massenparametern aufweisen. Dies kann die Güte der Drehmomentensensorkalibration beeinflussen. Um den Einfluss der Gelenkelastizitäten bei der Verwendung verschiedener Massen zu kompensieren, wird ein Ansatz zu dessen Kompensation vorgestellt.

Zur Umrechnung der Spannungswerte in Drehmomente sind, aufgrund der Linearität einer Vollbrückenschaltung aus DMS, Verstärkungsfaktoren und Offsets nötig. Die Sensoroffsets können in diesem Schritt durch die Bildung der Differenzenmomente nicht identifiziert werden. Zu deren Ermittlung wird die Methode zur Identifikation der Massenparameter entsprechend erweitert. Neben den Verstärkungsfaktoren werden zudem fertigungsbedingte Fehler, die mögliche Abweichungen der Sensorachse zu der tatsächlichen Gelenkachse betreffen, in das Sensormodell implementiert. Das nichtlineare Minimierungsproblem, das zur Identifikation der Sensorparameter nötig ist, kann durch verschiedene Annahmen linearisiert werden. Hierdurch ist es möglich ohne die Vorgabe von Startwerten die Sensoren zu kalibrieren. Durch die Linearisierung hervorgerufene Abweichungen, können durch eine nichtlineare Optimierung, in einem nachfolgendem Schritt eliminiert werden. Als Startwerte dienen hierbei die zuvor identifizierten Sensorparameter.

Bei der Kalibration der roboterinternen Drehmomentensensorik können deutliche Steigerungen für die Güte der Messung der Drehmomente bzgl. der nicht redundant gemessenen Achsen 2, 3, 4 und 6 erzielt werden. Der Grund hierfür sind die zusätzlich modellierten Abweichungen der Orientierung der Sensorachse zu derjenigen der Gelenkachse. Für die Drehmomentensensoren bzgl. der Achse 4 beträgt die Abweichung von den vorgegebenen Drehmomente nach der

Kalibration etwa 15 % gegenüber der Verwendung der bisher genutzten Parameter. Auch für die Achsen der Gelenke 2 und 3 können durch die zusätzlich modellierten Sensorparameter Steigerungen erreicht werden. Der Drehmomentsensor bzgl. Achse 2 hat nach der Kalibration eine mittlere Genauigkeit von 0.14 ± 0.7 , was einer Steigerung von ca. 30 % entspricht. Für die redundant gemessenen Drehmomente um die Drehachsen 1, 5 und 7 können ähnliche Werte für die Genauigkeiten erreicht werden, wie es zuvor der Fall war.

Die Drehmomente bzgl. der Gelenkachsen des MIRO werden mittels der Sensordaten und der inversen Dynamik berechnet. Diese werden zur Regelung des Roboters benötigt. Zur Identifikation der Massenparameter, wie Massen und Massenschwerpunkten wird ein Verfahren hergeleitet, was die Determinierung jener Parameter mittels linearer Minimierungsmethoden ermöglicht. Zusätzlich wird es mit diesem Verfahren ermöglicht die Offsets der Drehmomentensensoren zu ermitteln.

Die Simulation des Verfahrens zur Identifikation der Massenparameter zeigt die Tauglichkeit des Verfahrens die Massenschwerpunkte, die nötig für die Berechnung der messbaren Drehmomente sind, zu identifizieren.

8.2. Ausblick

In dieser Arbeit wurden die ersten beiden Schritte des Kalibrationsprozesses bereits anhand der experimentellen Aufnahme von Messungen durchgeführt (siehe Abbildung 8.1).

Zukünftig ist für die Verbesserung der Konditionierung der Identifikation der Massenparameter ein neuer Planungsalgorithmus für die Auswahl der Messposen zu entwickeln. Hierdurch könnte die nötige Anzahl aufzunehmender Daten verringert werden. Der Algorithmus sollte neben der variantenreichen Anregung der Drehmomente um die Sensorachsen, den gesamten Arbeitsraum des Roboters ausnutzen um Posen zu generieren. Desweiteren sollte die Redundanz der Kinematik wie in der kinematischen Kalibration genutzt werden. Hierdurch sollten die Komponenten der Massenschwerpunkte besser identifizierbar sein. Für diesen Planungsalgorithmus könnte zusätzlich ein Verfahren zur Minimierung der Kondition mittels einer nichtlinearen Optimierung entwickelt werden.

Desweiteren sollten die Drehmomentensensoren hinsichtlich eines Temperaturdrifts untersucht werden. Zur Kompensation kann das vorgestellte Verfahren angewandt und evaluiert werden.

Gemäß der Abbildung 8.1 sollte aufgrund der Abhängigkeiten der einzelnen Kalibrationschritte nach der Durchführung der Identifikation der Massenparameter eine Wiederholung des Kalibrationsprozesses stattfinden, um eine iterative Annäherung an das reale Robotermodell abschätzen zu können.

Nach Abschluss der Kalibrationen sind die Ergebnisse in die Robotersteuerung zu implementieren und mittels verschiedener Verfahren weitergehend verifiziert werden. Für eine Untersuchung hinsichtlich der Pose-Genauigkeit steht seit kurzem ein Messarm der Firma Faro am Institut zur Verfügung. Dieser kann Positionen mit einer Genauigkeit von 0.05 mm detektieren.

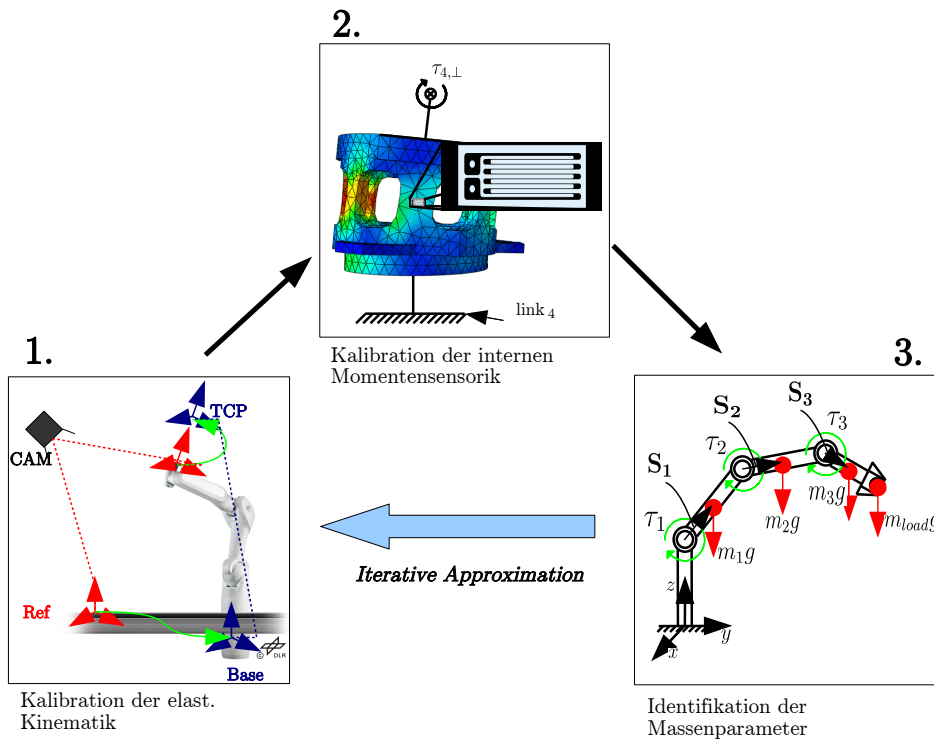


Abbildung 8.1.: Iterative Vorgehensweise bei der Roboterkalibration

Zur Zeit wird die Planung des OP-Setups, was die Positionierung des Roboters am Operationstisch betrifft, mittels eines Laserscanners und eines integrierten Autopointers durchgeführt, die am Endeffektor eines MIROs adaptiert werden. Mittels des Laserscanners wird die Oberfläche des Patienten vermessen. Durch die Berechnung der direkten Kinematik kann hieraus die Lage des Patienten bzgl. der Roboterbasis ermittelt werden. Die optimale Positionierung der Roboter, die abhängig von der Art der Operation und der Anatomie des Patienten ist, kann durch ein Optimierungsverfahren hergeleitet werden. Der Autopointer ermöglicht die Visualisierung der optimalen Roboterposition auf dem Operationstisch mittels eines Laserpointers. Dieser wird abhängig von der Gelenkkonfiguration und somit der Kinematik des Roboters durch ein internes Spiegelsystems so abgelenkt, dass immer die ermittelte Roboterposition auf dem Operationstisch zu sehen ist. Durch die kalibrierte Kinematik sollte diese Setup-Planung mit höherer Genauigkeit durchführbar sein.

Desweiteren kann das Driftverhalten des Roboter bei dessen Betrieb mit einem Drehmomentenregler untersucht werden. Durch die genauere Messung und Berechnung der Drehmomente nach der Drehmomentensensorkalibration und der Identifikation der Massenparameter sollte eine deutliche Steigerung der Performance der Graviationskompensation erkennbar sein.

A. Anhang

A.1. Kalibration einer Roboterkinematik

$$\mathbf{T}_1^{i-1}(\lambda) = \begin{bmatrix} C(\Delta\Theta_i) & -S(\Delta\Theta_i) & 0 & \Delta a_{i-1} \\ S(\Delta\Theta_i) \cdot C(\Delta\alpha_{i-1}) & C(\Delta\Theta_i) \cdot C(\Delta\alpha_{i-1}) & -S(\Delta\alpha_{i-1}) & -S(\Delta\alpha_{i-1}) \cdot \Delta d_i \\ S(\Delta\Theta_i) \cdot S(\Delta\alpha_{i-1}) & C(\Delta\Theta_i) \cdot S(\Delta\alpha_{i-1}) & C(\Delta\alpha_{i-1}) & C(\Delta\alpha_{i-1}) \cdot (\Delta d_i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

$$\text{mit } \Delta\Theta_i = \Theta_i + q_i + \lambda_{\Theta_i},$$

$$\Delta d_i = d_i + \lambda_{d_i}$$

$$\Delta\alpha_{i-1} = \alpha_{i-1} + \lambda_{\alpha_{i-1}}$$

$$\Delta a_{i-1} = a_{i-1} + \lambda_{a_{i-1}}$$

(A.2)

A.2. Positionsübertragungsmatrizen

Die Messwertaufnahme für die Positionsregelung beim MIRO erfolgt mit den Messungen der Motorencoder. Diese entsprechen, aufgrund der Harmonic-Drive-Untersetzungsgetriebe und den in den Koppelgelenken verwendeten Kegelraddifferentialgetrieben, nicht der abtriebsseitigen Gelenkposition. Zur Umrechnung der Sensorwerte auf den Abtrieb bzw. Antrieb bzgl. der Gelenkpotentiometer dienen Positionsübertragungsmatrizen. Die folgende Tabelle A.1 enthält die Positionsübertragungsmatrizen.

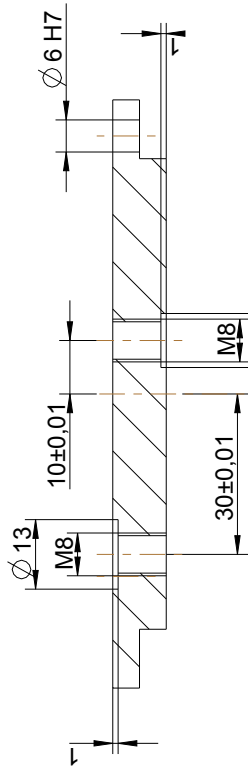
Tabelle A.1.: Positionsübertragungsmatrizen

| Antrieb zu Abtrieb | Abtrieb zu Antrieb |
|---|---|
| $\begin{pmatrix} q_{\Theta,6} \\ q_{\Theta,7} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Theta_6 \\ \Theta_7 \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} \Theta_{poti,6} \\ \Theta_{poti,7} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_{poti,6} \\ q_{poti,7} \end{pmatrix}$ |
| $\begin{pmatrix} q_{\Theta,4} \\ q_{\Theta,5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Theta_4 \\ \Theta_5 \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} \Theta_{poti,4} \\ \Theta_{poti,5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_{poti,4} \\ q_{poti,5} \end{pmatrix}$ |
| $\begin{pmatrix} q_{\Theta,2} \\ q_{\Theta,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.5 & 0.5 \\ -0.5 & -0.5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Theta_2 \\ \Theta_3 \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} \Theta_{poti,2} \\ \Theta_{poti,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_{poti,2} \\ q_{poti,3} \end{pmatrix}$ |
| $q_{\Theta,1} = -1 \cdot \Theta_1$ | $\Theta_{poti,1} = -1 \cdot q_{poti,1}$ |

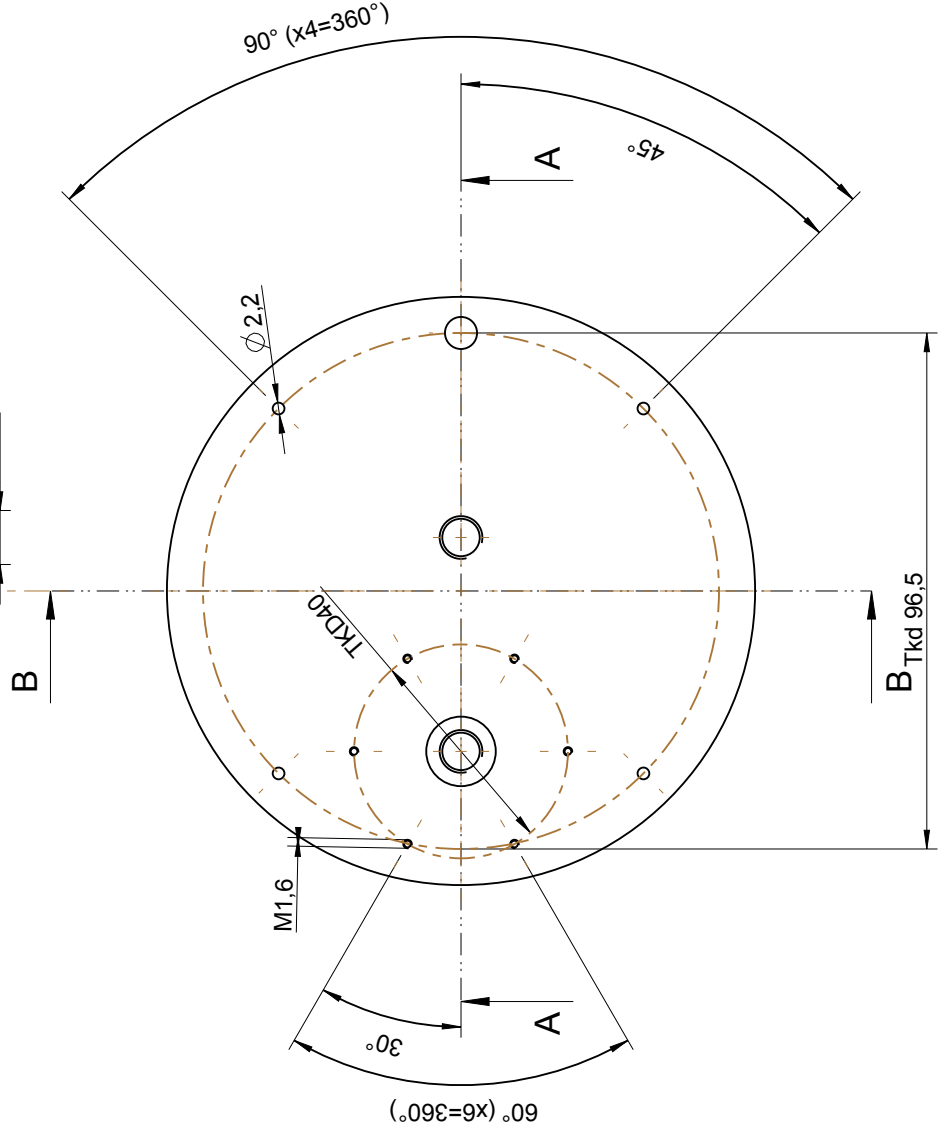
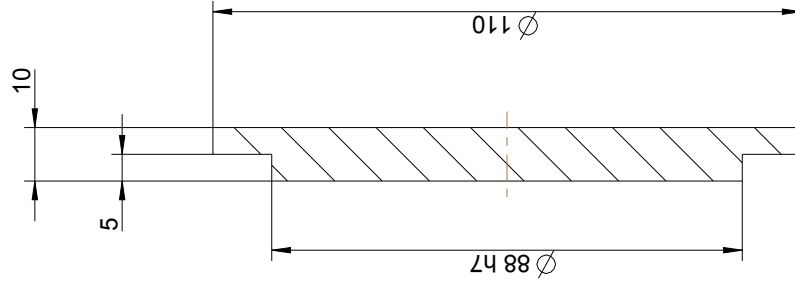
Hierbei werden mit Θ_i die Sensorwerte der Motorencoder bezeichnet, die bereits mit den Untersetzungsverhältnissen der Harmonic-Drive Getriebe umgerechnet worden sind.

A.3. Auslegung und Konstruktion eines multifunktionalen Kalibrationstools

Schnitt A-A



Schnitt B-B



DLR
DLR Oberflächentechnik
Electronics
and Mechatronics
D-82234 Weßling
Tel: (+49) 08152/28-2400 Fax: -1134
All Rights Reserved - Copyright DIN 34

General Tolerance: DIN 7186-GR
All Edges: DIN 6764
Surface Treatment: LN 9368
DIN A3
Surface: DIN ISO 1302
Material: AIMgSiPb

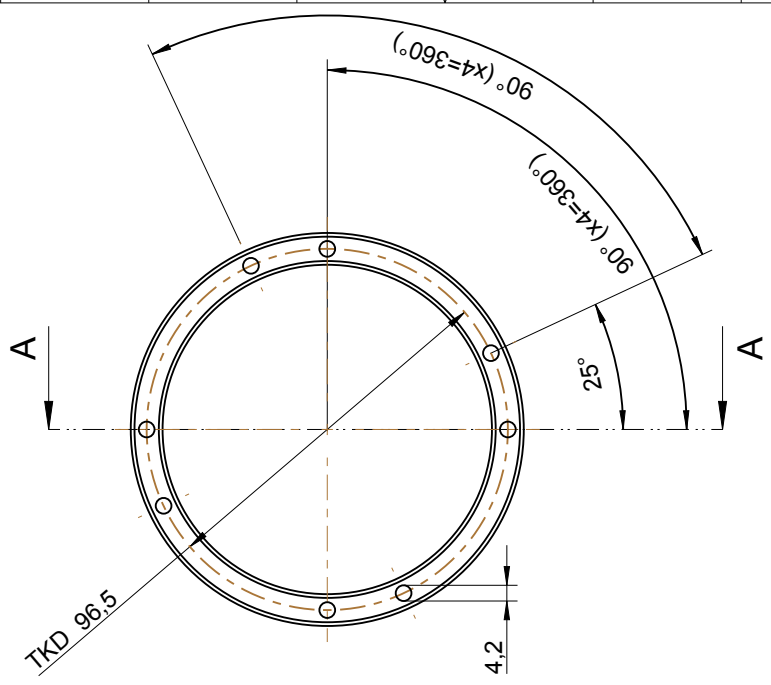
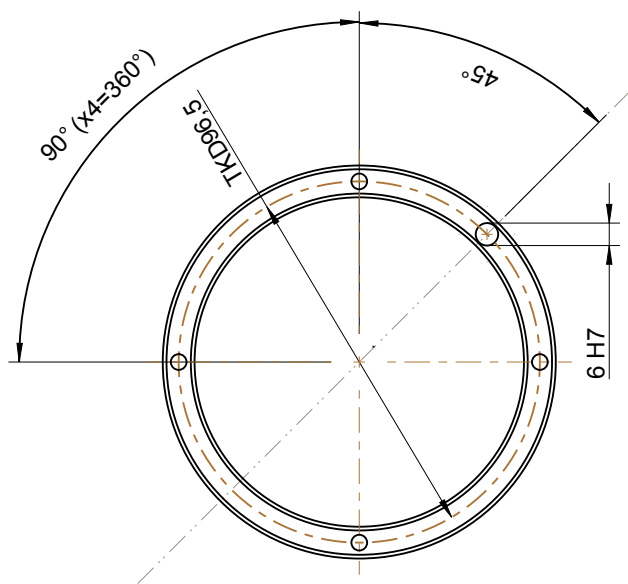
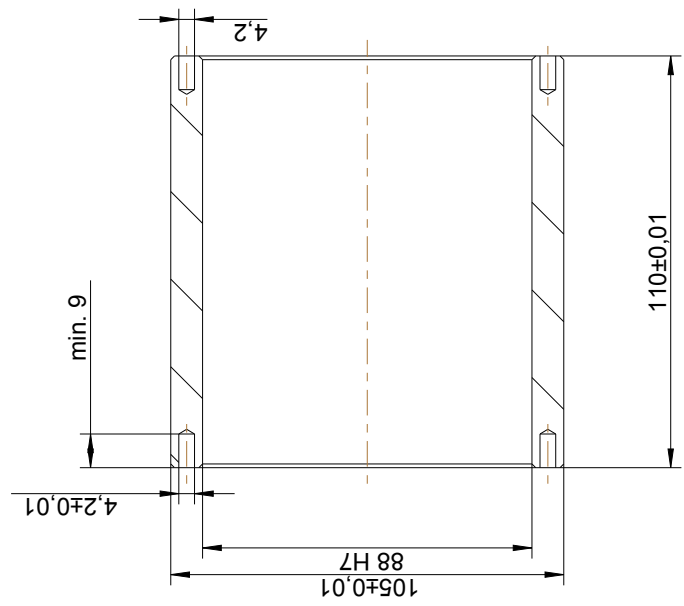
Qty 1
M 1:1
DIN A3
Material: AIMgSiPb

| | | | | | |
|-------------|--|-----------|---------------------------------|-------|------|
| created by | | model: | MIROCALI_TOOL_MONTAGEPLATTBART | Sheet | Rev. |
| modified by | | file: | MIROCALI_TOOL_MONTAGEPLATTE.DRW | Rev. | 1/1 |
| checked by | | Mass (g): | 196 g | | |

MIROCALI_TOOL_MONTAGEPLATTE

| | | | |
|--------|---------------------------------|-------|------|
| No: | | Rev. | |
| model: | MIROCALI_TOOL_MONTAGEPLATTBART | Sheet | Rev. |
| file: | MIROCALI_TOOL_MONTAGEPLATTE.DRW | Rev. | 1/1 |

SCHNITT A-A



Alle Fasen 45°x1

Tiefe aller Bohrungen: min. 9

DLR Oberflächentechnik
Electronics
and Mechatronics
D-82234 Weising
Tel: (+49) 0815328-2400 Fax: -1134
All Rights Reserved - Copyright DIN 34

General Tolerance: DIN 7185-GR
All Edges: DIN 6784
Surface Treatment: LN 9388

DIN A3
M 7:10
Qty 1
Material:
Polyoxymethylen (POM)

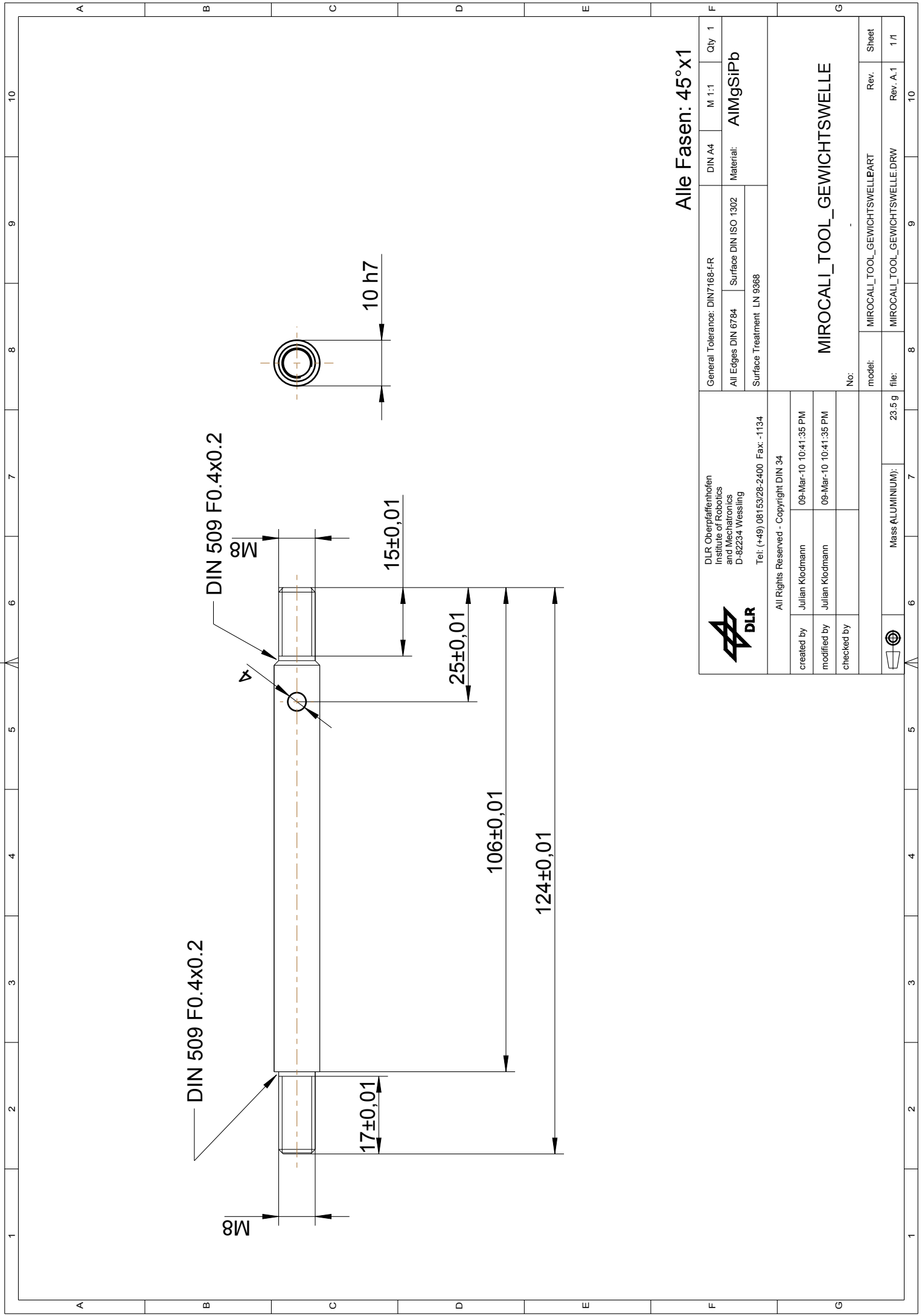
created by: Julian Köckmann 09-Mar-10 10:05:39 PM
modified by: Julian Köckmann 09-Mar-10 10:05:39 PM
checked by:

No:
model: MIROCALL_TOOL_RAHMEN.MRT
file: MIROCALL_TOOL_RAHMEN.DRW


Mass POM: 396 g
Rev. A.1
Rev. A.1
1/1

MIROCALL_TOOL_RAHMEN

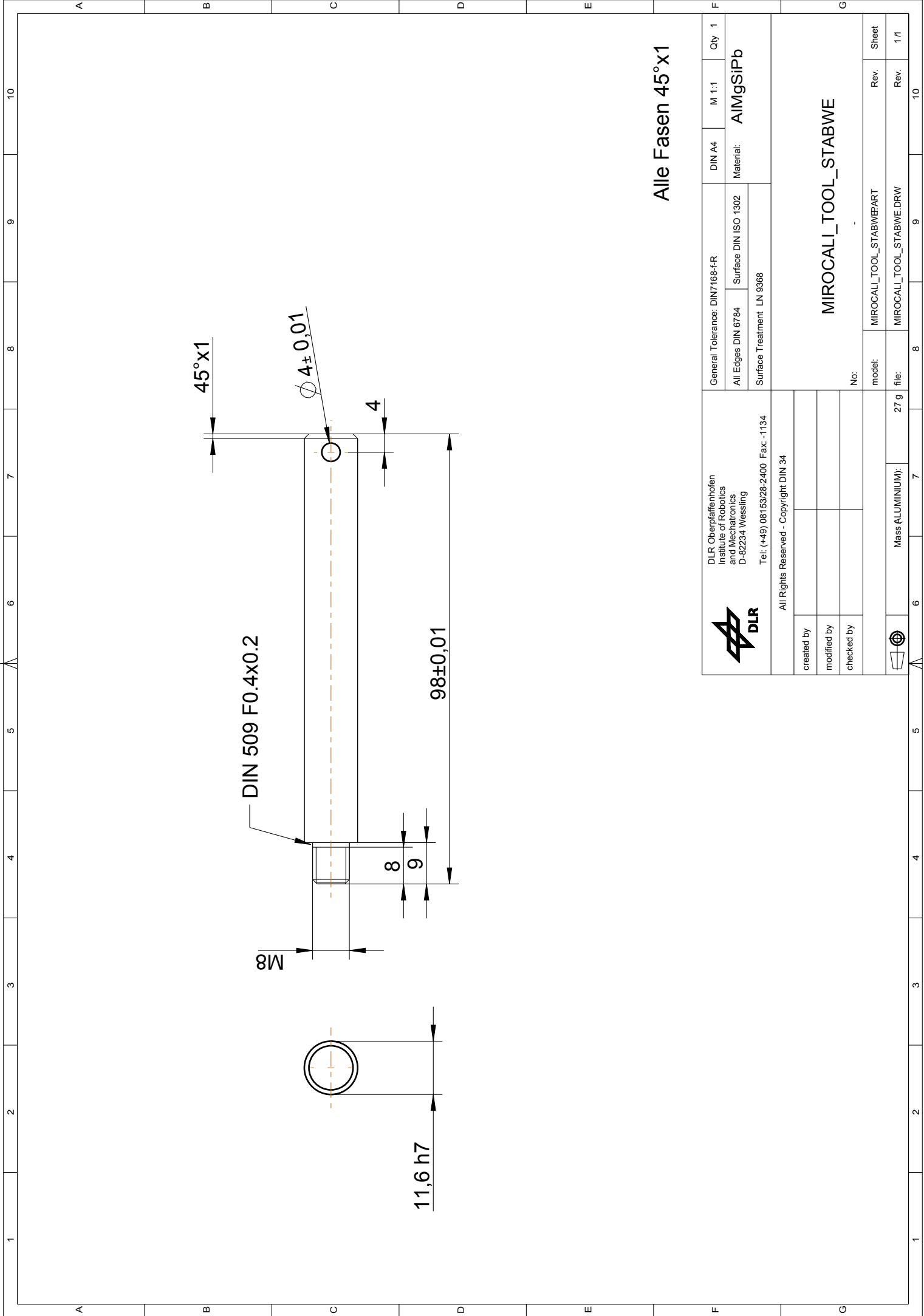
| | | |
|--------------------------|------|-----|
| Sheet | Rev. | 1/1 |
| MIROCALL_TOOL_RAHMEN.MRT | Rev. | A.1 |
| MIROCALL_TOOL_RAHMEN.DRW | Rev. | A.1 |




Alle Fasen: 45°x1

| | | | | |
|---|--------------------------------|---------------------------------|--------------------|-------|
|  DLR Oberpfaffenhofen Institute of Robotics and Mechatronics D-82234 Wessling Tel: (+49) 08153/28-2400 Fax: -1134 | General Tolerance: DIN7168-f-R | | DIN A4 | Qty 1 |
| | All Edges DIN 6784 | Surface DIN ISO 1302 | Material: AIMgSiPb | |
| | Surface Treatment: LN 9368 | | | |
| All Rights Reserved - Copyright DIN 34 | | | | |
| created by | Julian Klodmann | 09-Mar-10 10:41:35 PM | | |
| modified by | Julian Klodmann | 09-Mar-10 10:41:35 PM | | |
| checked by | | | | |
| Mass (ALUMINIUM): | | 23.5 g | | |
| model: | | MIROCALI_TOOL_GEWICHTSWELLEART | Rev. | Sheet |
| file: | | MIROCALI_TOOL_GEWICHTSWELLE.DRW | Rev. A.1 | 1 / 1 |

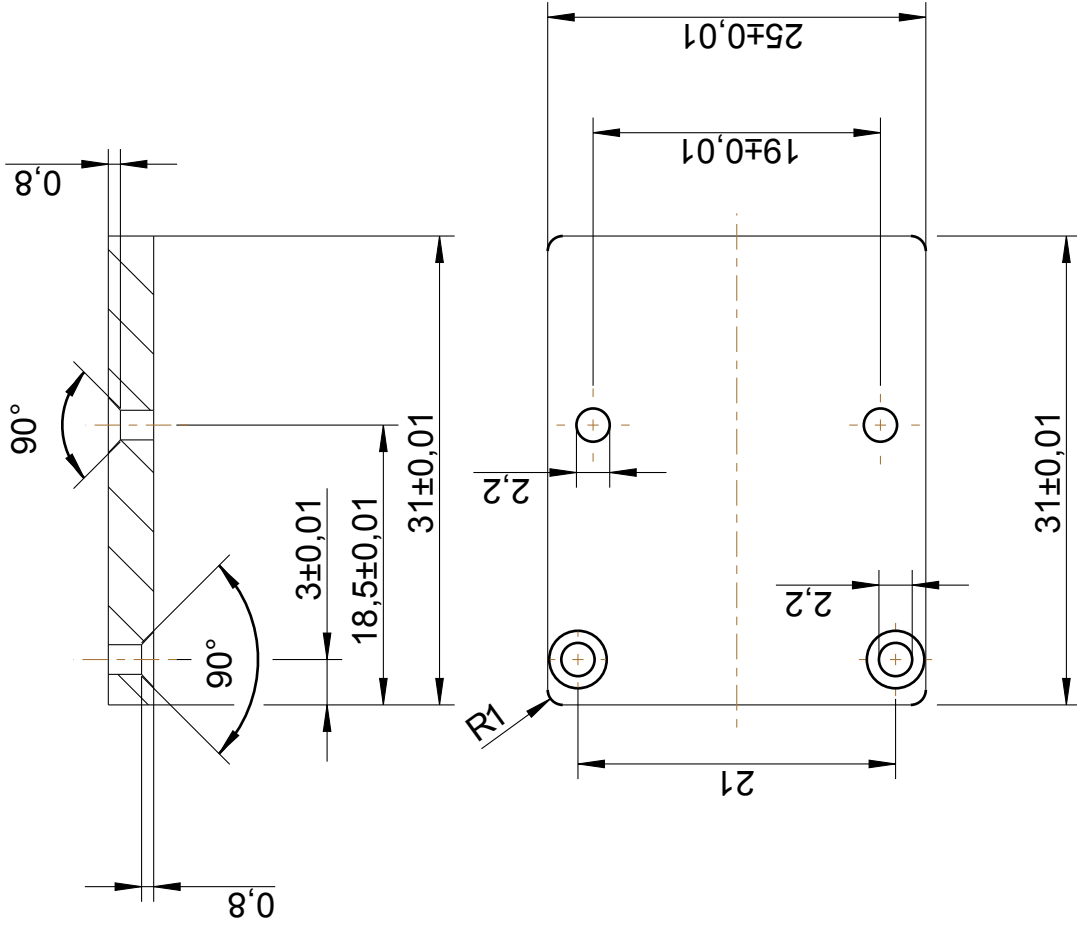
MIROCALI_TOOL_GEWICHTSWELLE



Alle Fasen 45°x1

| | | | | |
|---|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------|
|  DLR Oberpfaffenhofen Institute of Robotics and Mechatronics D-82234 Wessling Tel: (+49) 08153/28-2400 Fax: -1134 | General Tolerances: DIN7168-f-R | | DIN A4 | Qty 1 |
| | All Edges DIN 6784 | Surface DIN ISO 1302 | Material: AIMGSIPb | |
| | Surface Treatment: LN 9368 | | | |
| All Rights Reserved - Copyright DIN 34 | | | | |
| created by | | | | |
| modified by | | | | |
| checked by | | | | |
| | Mass (ALUMINIUM): | 27 g | file: | |
| | model: | MIROCALI_TOOL_STABWEPART | Rev. | Sheet |
| | No: | - | MIROCALI_TOOL_STABWE.DRW | Rev. |
| | | | | 1 / 1 |

Schnitt C-C



3±0,01

Alle Radien: R1



DLR Oberpfaffenhofen
Institute of Robotics
and Mechatronics
D-82234 Wessling

Tel: (+49) 08153/28-2400 Fax: -1134

All Rights Reserved - Copyright DIN 34

created by
modified by
checked by



Mass(INASSIGNED):

6 g

file:

model:

No:

MIROCALI_TOOL_LEDADAPTER

| Rev. | Sheet |
|-------|-------|
| 1 / 1 | 1 / 1 |

General Tolerances: DIN7168-f-R

All Edges DIN 6784

Surface DIN ISO 1302

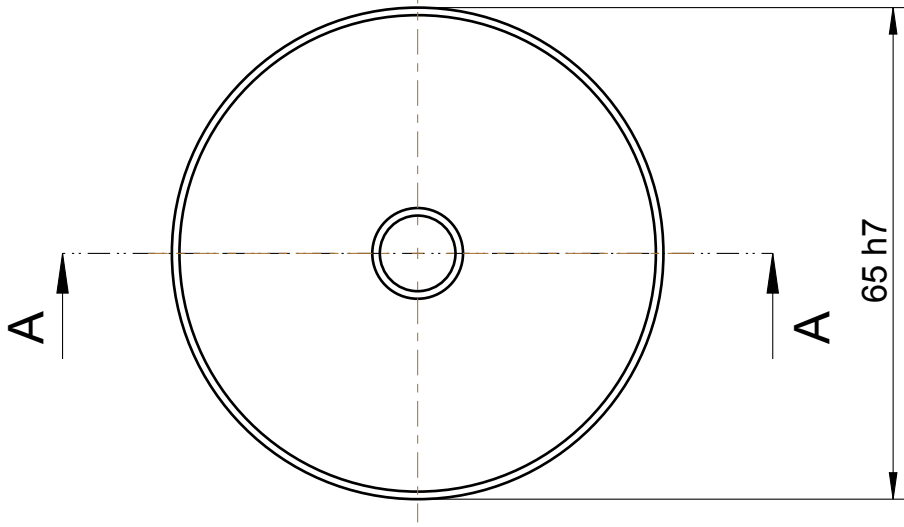
Surface Treatment: LN 9368

DIN A4

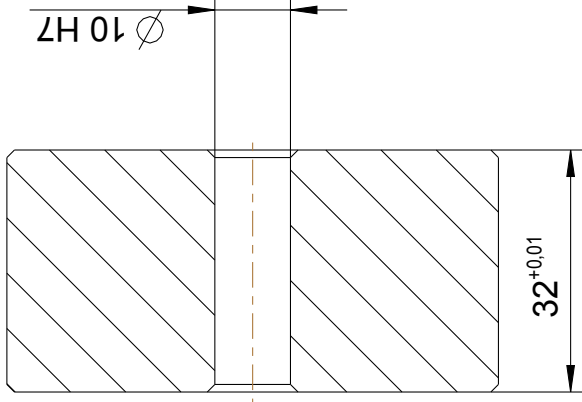
M 1:2

Qty 4


Material: AIMGSiPb

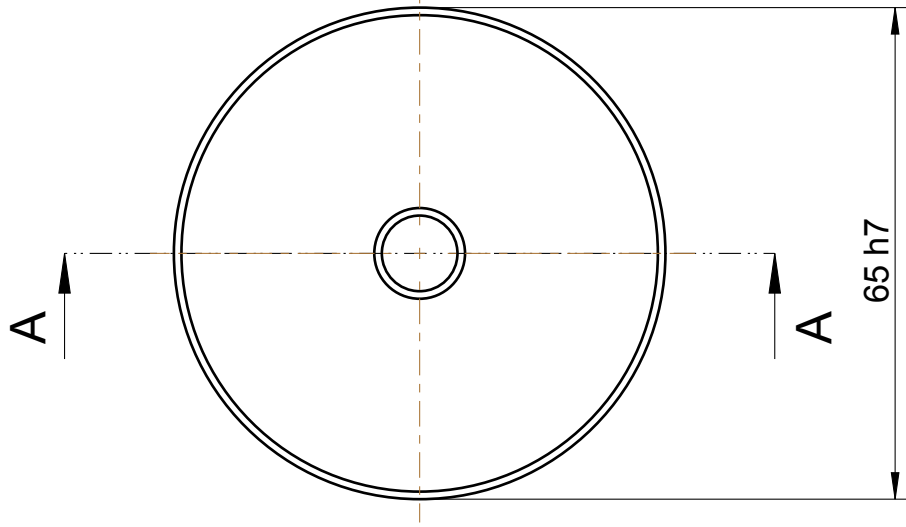


Schnitt A-A

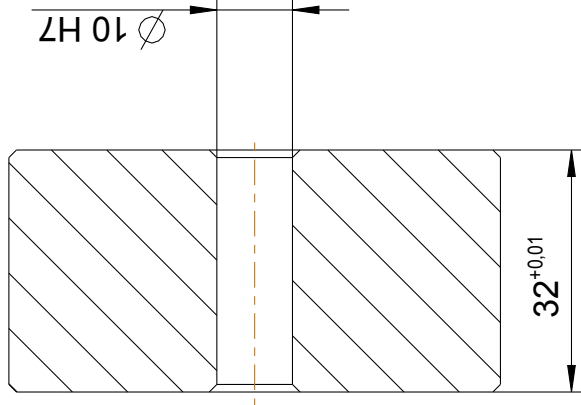


Alle Fasen: 45°x1


| | | | | | | | |
|---|--|--|-------|--|--|--------------------------------|-------|
|  | | DLR Oberpfaffenhofen Institute of Robotics and Mechatronics D-82234 Wessling Tel: (+49) 08153/28-2400 Fax: -1134 | | General Tolerances: DIN7168-f-R All Edges DIN 6784 Surface Treatment LN 9368 | | DIN A4 M 1:1 Qty 3 | |
| All Rights Reserved - Copyright DIN 34 | | Surface DIN ISO 1302 Material: Polyoxymethylen (POM) | | MIROCALI_TOOL_GEWICHTSRING_POM | | MIROCALI_TOOL_GEWICHTSRING_POM | |
| created by | | No: | | | No: - model: MIROCALI_TOOL_GEWICHTSRING_POM | | Sheet |
| modified by | | Mass (): | 0,1 g | | MIROCALI_TOOL_GEWICHTSRING_POM.DRW | | Rev. |
| checked by | | | | | | | Rev. |
| | | | | | | 1 / 1 | |

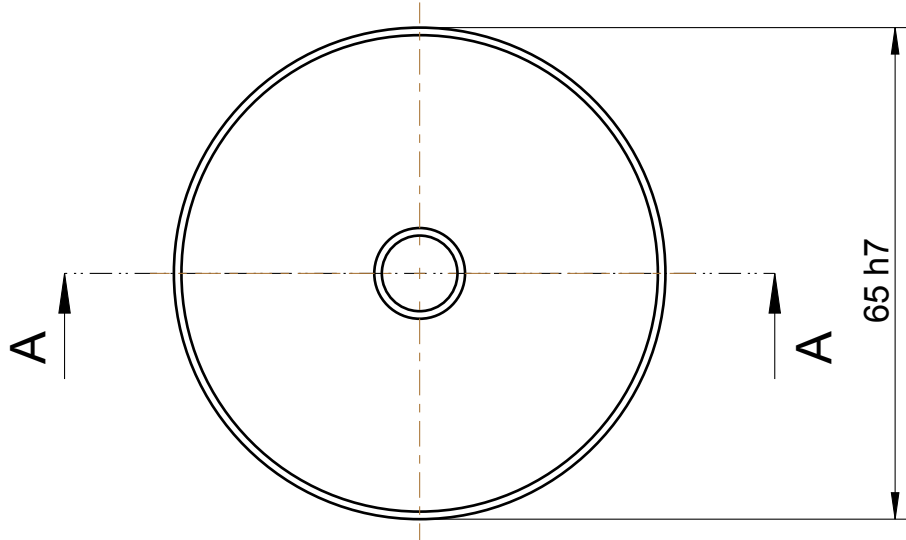


Schnitt A-A

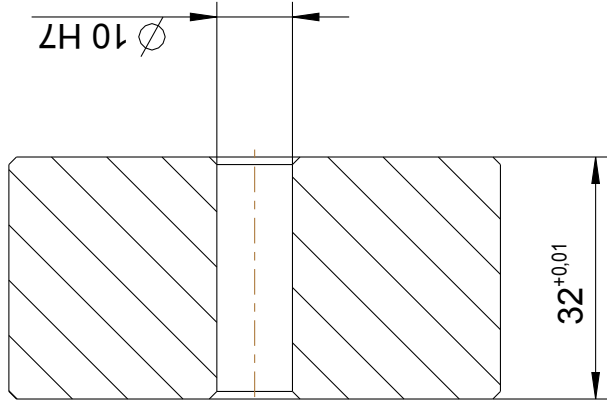


Alle Fasen: 45°x1


| | | | | | |
|--|----------|--|-----------------------------------|--------------------------|--|
|  DLR Oberpfaffenhofen Institute of Robotics and Mechatronics D-82234 Weßling Tel: (+49) 08153/28-2400 Fax: -1134 | | General Tolerances: DIN7168-f-R All Edges DIN 6784 Surface Treatment LN 9368 | | DIN A4 M 1:1 Qty 3 | |
| All Rights Reserved - Copyright DIN 34 | | Surface DIN ISO 1302 | | Material: AIMgSiPb | |
| created by | | No: | | | |
| modified by | | model: | MIROCALI_TOOL_GEWICHTSRING_0ART | | |
| checked by | | file: | MIROCALI_TOOL_GEWICHTSRING_AL.DRW | | |
| | Mass (): | 0,1 g | Rev. | Sheet | |
| | | | Rev. | 1 / 1 | |
| MIROCALI_TOOL_GEWICHTSRING_AL | | | | | |



Schnitt A-A



Alle Fasen: 45°x1

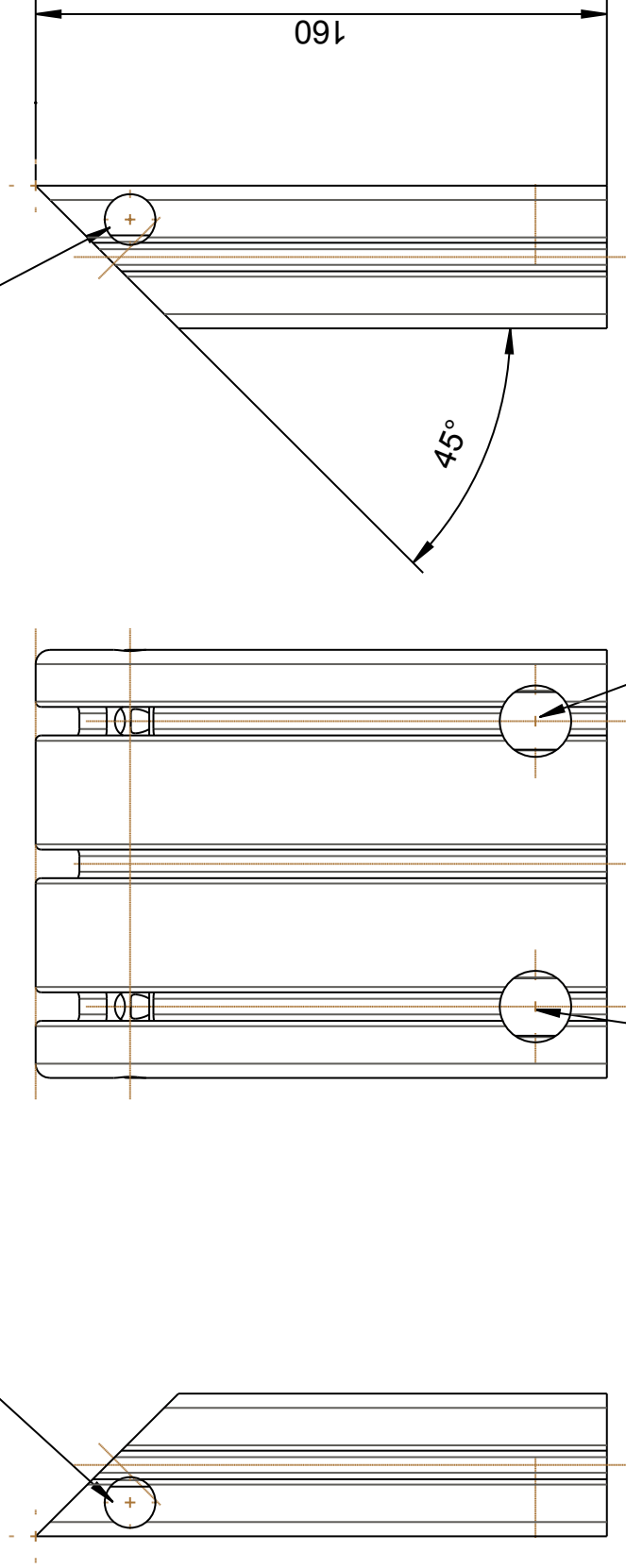
| | | | | |
|--|---------------------------------|-----------------------------------|----------------|-------|
|  DLR Oberpfaffenhofen Institute of Robotics and Mechatronics D-82234 Weßling Tel: (+49) 08153/28-2400 Fax: -1134 | General Tolerances: DIN7168-f-R | | DIN A4 | Qty 3 |
| | All Edges DIN 6784 | Surface DIN ISO 1302 | Material: MS58 | |
| | Surface Treatment LN 9368 | | | |
| All Rights Reserved - Copyright DIN 34 | | | | |
| created by | | | | |
| modified by | | | | |
| checked by | | | | |
| | Mass (): | 0,1 g | | |
| | No: | - | | |
| | model: | MIROCALI_TOOL_GEWICHTSRING@PART | Rev. | Sheet |
| | file: | MIROCALI_TOOL_GEWICHTSRING_MS.DRW | Rev. | 1 / 1 |

MIROCALI_TOOL_GEWICHTSRING_MS

A.4. Auslegung und Konstruktion eines Winkelprofils

Anschl.bearbeitung Gehrungsverbinder

Anschl.bearbeitung Gehrungsverbinder



Anschl.bearbeitung Stufenbohr. D20x16

Anschl.bearbeitung Stufenbohr. D20x16

P8_120x40_L165 (Pos.-nr. 5)

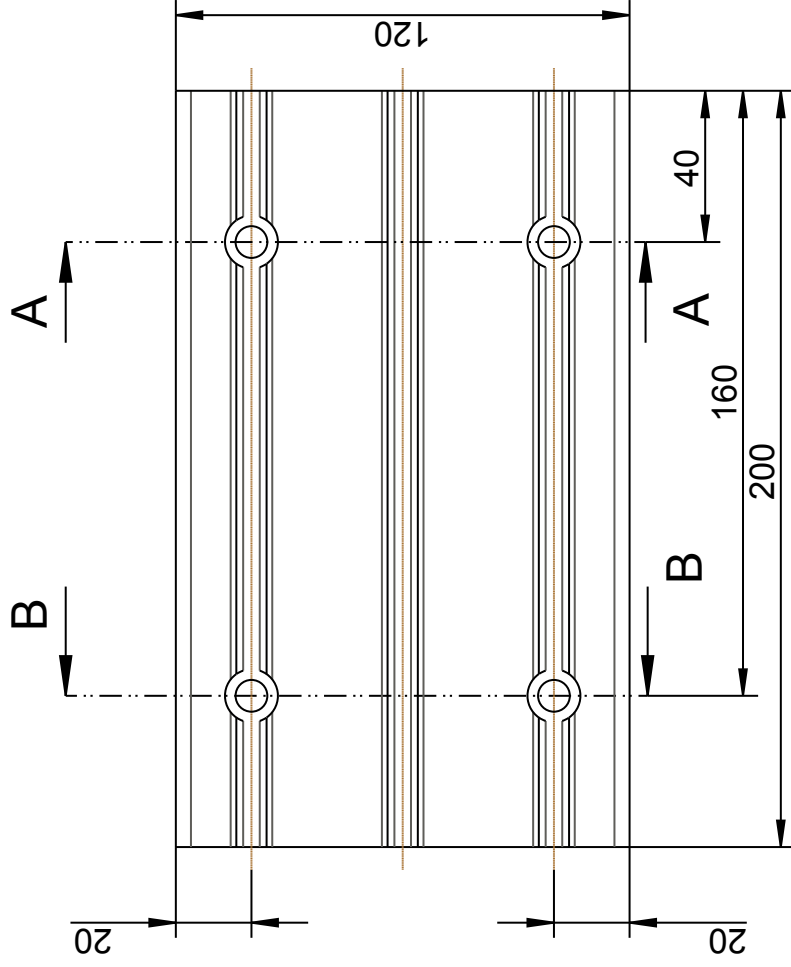
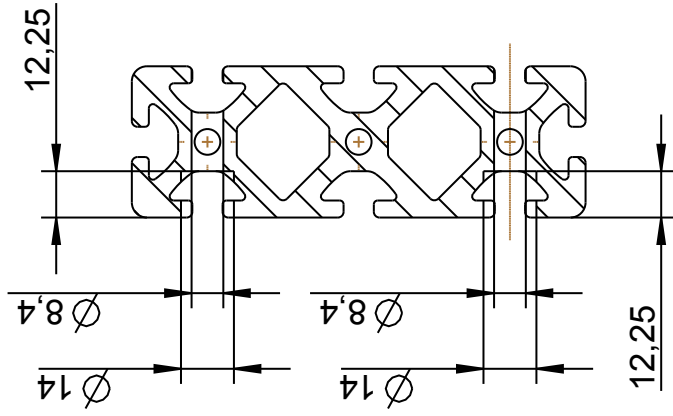
--> 1x Sägebearbeitung Gehrungsschnitt (Pos.-nr. 9)

--> 2x Anschlussbearbeitung Gehrungsverbinder (Pos.-nr. 8)

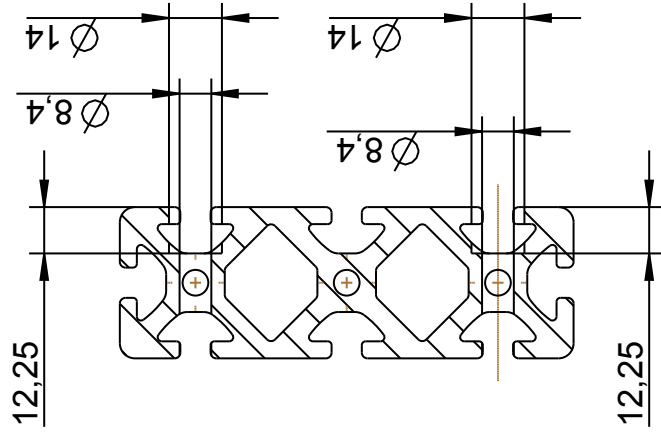
--> 2x Anschlussbearbeitung Stufenbohrung (Pos.-nr. 11)

Maßstab 1:2

Schnitt B-B



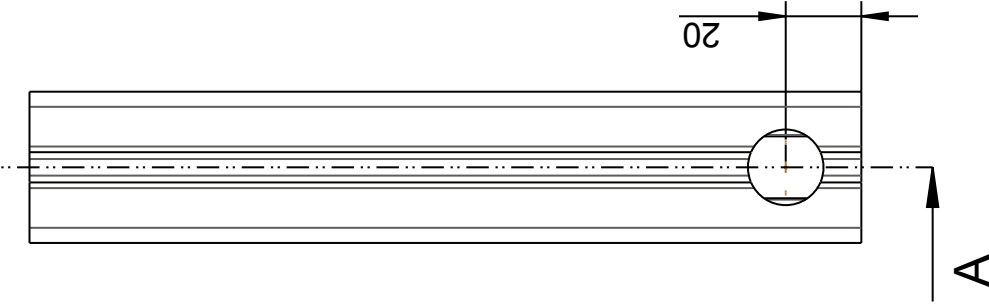
Schnitt A-A



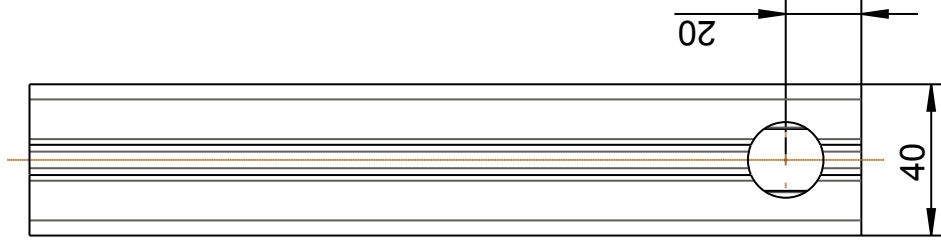
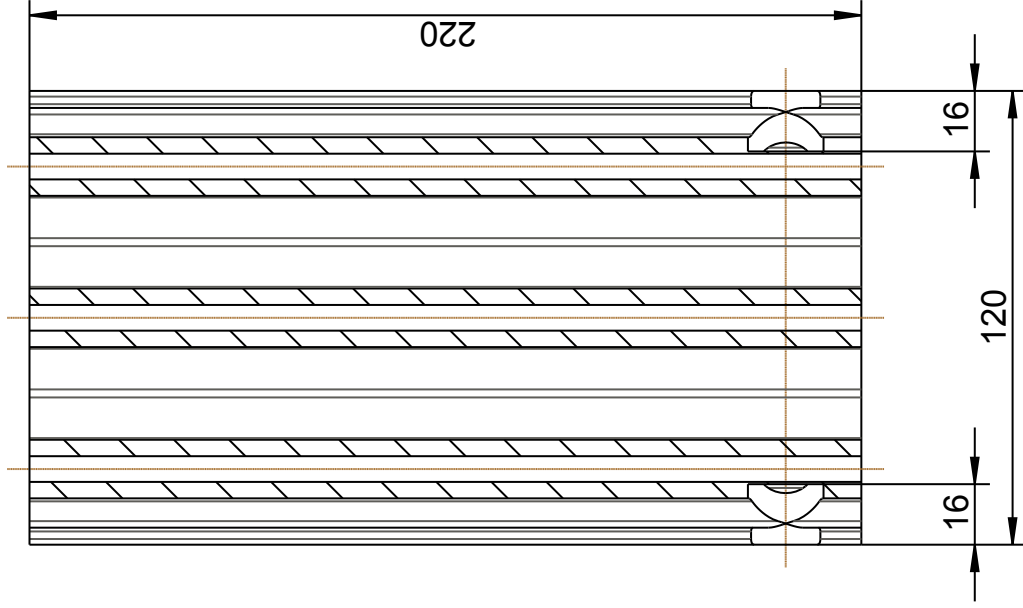
P8_120x40_L200 (Pos.-nr. 1)

--> 4x Sonderbearbeitung, Bohrung mir Zylindersenkung

A



Schnitt A - A



P8_120x40_L220 (Pos.-nr. 3)
--> 2x Anschlussbearbeitung Stufenbohrung D20x16 (Pos.-nr. 11)

Literaturverzeichnis

- [1] 9283, DIN EN I.: *Industrieroboter - Leistungskenngrößen und zugehörige Prüfmethode*, (ISO 9283 : 1998)
- [2] ABDERRAHIM, M. ; KHAMIS, A. ; GARRIDO, S. ; MORENO, L.: Accuracy and Calibration Issues of Industrial Manipulators. In: *Industrial Robotics: Programming, Simulation and Application* (2006)
- [3] ABDERRAHIM, M. ; WHITTAKER, A. R.: Kinematic model identification of industrial manipulators. In: *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 16 (2000), S. 1 – 8
- [4] ALBU-SCHÄFFER, A.: *Regelung von Robotern mit elastischen Gelenken am Beispiel der DLR-Leichtbauarme*, Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik - Technische Universität München, Diss., 2001
- [5] ALBU-SCHÄFFER, A. ; HADDADIN, S ; OTT, Ch ; STEMMER, A. ; WIMBÖCK, T. ; HIRZINGER, G.: The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments. In: *Industrial Robot: An International Journal* 34/5 (2007), S. 376–385
- [6] AN, C. ; ATKESON, C. ; HOLLERBACH, J.: Estimation of Inertial Parameters of Rigid Body Links of Manipulators. In: *Proceedings of 24th Conference on Decision and Control*, 1985
- [7] CRAIG, J.: *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. 3rd. 3. Pearson Prentice Hall, 2005
- [8] HADDADIN, S. ; ALBU-SCHAEFFER, A. ; DE LUCA, A. ; HIRZINGER, G.: Collision Detection and Reaction: A Contribution to Safe Physical Human-Robot Interaction. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2008)*, 2008
- [9] HAGN, U. ; KONIETSCHKE, R. ; TOBERGTE, A. ; NICKL, M. ; JÖRG, S. ; KÜBLER, B. ; PASSIG, G. ; GRÖGER, M. ; FRÖHLICH, F. ; SEIBOLD, U. ; LE-TIEN, L. ; ALBU-SCHÄFFER, A. ; NOTHELPER, A. ; HACKER, F. ; GREBENSTEIN, M. ; HIRZINGER, G.: DLR MiroSurge: a Versatile System for Research in Endoscopic Telesurgery. In: *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* (2009)
- [10] HAGN, U. ; NICKL, M. ; JOERG, S. ; PASSIG, G. ; BAHL, T. ; NOTHELPER, A. ; HACKER, F. ; LE-TIEN, L. ; ALBU-SCHAEFFER, A. ; KONIETSCHKE, R. ; GREBENSTEIN, M. ; WARPUP, R. ; HASLINGER, R. ; FROMMBERGER, M. ; HIRZINGER, G.: The DLR MIRO: a versatile lightweight robot for surgical applications. In: *Industrial Robot: An International Journal* 35, 4 (2008), S. 324–336

- [11] HAGN, U. ; NICKL, M. ; JÖRG, S. ; TOBERGTE, A. ; KÜBLER, B. ; PASSIG, G. ; GRÖGER, M. ; FRÖHLICH, F. ; SEIBOLD, U. ; KONIETSCHKE, R. ; LE-TIEN, L. ; ALBU-SCHÄFFER, A. ; GREBENSTEIN, M. ; ORTMAIER, T. ; HIRZINGER, G.: DLR MiroSurge: Towards versatility in surgical robotics. In: *Proceedings Curac* (2008), S. 143 – 146
- [12] HAGN, U. ; NICKL, S. M. and J. M. and Jörg ; TOBERGTE, A. ; KÜBLER, B. ; SEIBOLD, U. ; KONIETSCHKE, R. ; ORTMAIER, T. ; HIRZINGER, G.: Telemanipulator for Remote Minimally Invasive Surgery. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* (2008), S. 28–28
- [13] HARTENBERG, R. ; DENAVIT, J.: *Kinematic Synthesis of Linkages*. McGraw-Hill Book Company, 1964
- [14] HAYATI, S. ; TSO, K. ; ROSTON, G.: Robot Accuracy Calibration. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* (1988)
- [15] HEIMANN, B. ; POPP, K. ; GERTH, W.: *Mechatronik*. Hanser Verlag, 1998
- [16] HOLLERBACH, J. M. ; WAMPLER, C. W.: The Calibration Index and Taxonomy for Robot Kinematic Calibration Methods. In: *The International Journal of Robotics Research* 15 (1996), S. 573–591
- [17] KHALIL, W. ; BESNARD, S.: Geometric Calibration of Robots with Flexible Joints and Links. In: *Journal of Intelligent and Robotis Systems* 34 (2002), S. 357 – 379
- [18] KHALIL, W. ; DOMBRE, E.: *Modeling, Identification & Control of Robots*. Kogan Page Science, 2004
- [19] KLODMANN, J.: *Entwicklung und Anwendung von Methoden zur kinematischen Kalibration eines Leichtbauroboters*. Projektarbeit 2009
- [20] KONIETSCHKE, R. ; ORTMAIER, T. ; OTT, C. ; HAGN, U. ; LE-TIEN, L. ; HIRZINGER, G.: Concepts of Human-Robot Cooperation for a New Medical Robot. In: *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2006
- [21] LE-TIEN, L.: *Ansätze zur entkoppelten Regelung von mechanisch gekoppelten Doppelgelenken eines DLR-Medizinroboters*, TU Dresden, Diss., vrs. 2010
- [22] MERZIGER, G. ; MÜHLBACH, G. ; WILLE, D. ; WIRTH, T.: *Formeln + Hilfen zur höheren Mathematik*. Binomi Verlag, 2001
- [23] METRIS: *K-CMM v6.2 - Bedienungsbandbuch (Juli 2006)*. Metris, Juli 2006
- [24] METRIS, N. V.: *K400/K600 - Help Pages, Hardware & Software Guide*. Metris N. V.
- [25] METROLOGY, Krypton I.: *Krypton Help Pages on Roboscope/ISO v6.3*. Krypton Industrial Metrology, Oktober 2004
- [26] ROTH, Z ; MOORING, B. ; RAVANI, B.: An Overview of Robot Calibration. In: *IEEE Journal of Robotics and Automation* (1987), S. 377 – 385

- [27] SLABAUGH, G.: Computing Euler angles from rotation matrix. . – <http://www.gregslabaugh.name/publications/euler.pdf>
- [28] WIEST, Ulrich: *Kinematische Kalibrierung von Industrierobotern*, Universität Karlsruhe, Diss., 2001
- [29] XSENS TECHNOLOGIES B.V. (Hrsg.): *MTi and MTx User Manual and Technical Documentation*. Xsens Technologies B.V., 2008

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1.1. | Erste und zweite Generation der medizinischen Leichtbauroboter des DLR . . . | 1 |
| 1.2. | Iterative Roboterkalibration | 3 |
| 2.1. | Koordinatensysteme und Transformationen | 6 |
| 2.2. | Kinematische Zusammenhänge | 7 |
| 2.3. | Kinematische Redundanz [15] | 8 |
| 2.4. | Posegenauigkeit | 11 |
| 2.5. | Einzelachskalibration - Kreisbogenanalyse | 13 |
| 2.6. | Schematischer Messaufbau | 15 |
| 3.1. | Koordinatensysteme des MIRO | 24 |
| 3.2. | Koordinatensysteme des MIRO | 25 |
| 3.3. | Messprinzip der Drehmomentensensoren | 27 |
| 3.4. | Drehmomentensensorik beim MIRO | 28 |
| 3.5. | Kommunikation und Rechnerstruktur, sowie Überwachung der Zustände des Roboters | 30 |
| 3.6. | Gelenkidentifikationsprüfstand | 31 |
| 3.7. | Schwingung | 33 |
| 3.8. | Drehmomentensensorkalibration auf dem Gelenkidentifikationsprüfstand | 35 |
| 3.9. | Komponenten des Kamerasystems | 36 |
| 3.10. | Genauigkeitszonen des Kamerasystems | 37 |
| 3.11. | IMU der Firma Xsens | 39 |
| 4.1. | Schematische Darstellung eines Koppelgelenks | 42 |
| 4.2. | Drehmomentensensor des Koppelgelenks 4/5 | 45 |
| 4.3. | FE-Analyse der Elastizität des Sensorkörpers bzgl. des Koppelgelenks 4/5 . . . | 47 |
| 4.4. | Klebefehler Koppelgelenk 2/3 | 53 |
| 4.5. | Kompensation der Elastizität für die Kalibration der Drehmomentensensorik . | 58 |
| 5.1. | Rauschanalyse eines Markers | 66 |
| 6.1. | Prinzipskizze des multifunktionalen Kalibrationstools | 75 |
| 6.2. | Multifunktionales Kalibrationstool | 76 |
| 6.3. | Winkelprofil | 77 |
| 7.1. | Ergebnisse der Kalibration der Roboterkinematik (Last = 0.7 kg) | 82 |
| 7.2. | Ergebnisse der Kalibration der Roboterkinematik (Last = 1.1 kg) | 83 |
| 7.3. | Ergebnisse der Kalibration der Roboterkinematik (Last = 1.8 kg) | 84 |
| 7.4. | Ergebnisse der Kalibration der Roboterkinematik (Last = 2.6 kg) | 84 |

| | |
|--|----|
| 7.5. Annäherung der Sensorwerte von dem redundanten Drehmomentsensor 1 an die berechneten Differenzenmomente | 87 |
| 7.6. Annäherung der Sensorwerte der Drehmomentsensoren 2 und 3 an die berechneten Differenzenmomente | 89 |
| 7.7. Annäherung der Sensorwerte von Drehmomentsensor 4 an die berechneten Differenzenmomente | 91 |
| 8.1. Iterative Vorgehensweise bei der Roboterkalibration | 96 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 3.1. | DH-Parameter des MIRO | 24 |
| 3.2. | Mechanische und virtuelle Gelenkanschlage | 26 |
| 3.3. | Vorgegebene Belastungsgrenzen der Drehmomentensensoren im Gelenkkoordinatensystem | 30 |
| 3.4. | Maximale Belastung der Drehmomentensensoren im Gelenkkoordinatensystem auf dem Gelenkidentifikationsprüfstand | 32 |
| 3.5. | Genauigkeitszonen des Messsystems Krypton K600 [23] | 37 |
| 4.1. | Steifigkeiten der Sensorkörper 4/5 und 6/7 in verschiedenen Richtungen und deren Mittelwert \bar{k} | 47 |
| 5.1. | Pose-Genauigkeit über 400 Posen nach Wahl von Startwerten | 68 |
| 5.2. | Pose-Genauigkeit über 400 Posen nach Wahl von Startwerten | 69 |
| 5.3. | Simulierte Winkelfehler bzgl. der Klebungen der DMS | 70 |
| 7.1. | Abweichungen der Differenzenmomente bzgl. dem redundanten Drehmomentensensor von Gelenk 1 von den berechneten hinsichtlich der alten und neu identifizierten Sensorverstärkungen | 87 |
| 7.2. | Abweichungen der Differenzenmomente bzgl. dem redundanten Drehmomentensensor von Gelenk 5 von den berechneten hinsichtlich der alten und neu identifizierten Sensorverstärkungen | 88 |
| 7.3. | Abweichungen der Differenzenmomente bzgl. dem redundanten Drehmomentensensor von Gelenk 7 von den berechneten hinsichtlich der alten und neu identifizierten Sensorverstärkungen | 88 |
| 7.4. | Gegenüberstellung der bisherigen und der neu identifizierten Sensorverstärkungen und deren prozentuale Abweichung | 89 |
| 7.5. | Abweichungen der Differenzenmomente bzgl. der Drehmomentsensoren von Gelenk 2 und 3 von den berechneten hinsichtlich der alten und neu identifizierten Sensorverstärkungen | 90 |
| 7.6. | Gegenüberstellung der bisherigen und der neu identifizierten Sensorverstärkungen bzgl. der Drehmomentsensoren 2 und 3 und deren prozentuale Abweichung, sowie identifizierte Winkelfehler | 90 |
| 7.7. | Abweichungen der Differenzenmomente bzgl. der Drehmomentsensoren von Gelenk 4 und 6 von den berechneten hinsichtlich der alten und neu identifizierten Sensorverstärkungen | 91 |
| 7.8. | Gegenüberstellung der bisherigen und der neu identifizierten Sensorverstärkungen bzgl. der Drehmomentsensoren 4 und 6 und deren prozentuale Abweichung, sowie identifizierte Winkelfehler | 92 |

A.1. Positionsübertragungsmatrizen 97